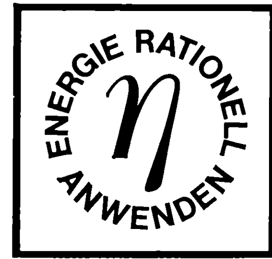
INFORMATION
ENERGIEANWENDUNG

ENERGIE RATIONELL ANWENDEN η

Prozeßanalyse zur Einsatzvorbereitung von Wärmepumpen



Prof. Dr.-Ing. G. Heinrich NPT

Prozeßanalyse zur Einsatzvorbereitung von Wärmepumpen

Institut für Energetik
Zentralstelle für rationelle Energieanwendung

Inhalt

1. Einsatzbedingungen für Wärmepumpen

1.1. Aufbau von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen

In den letzten Jahren sind in der DDR zunehmend Heizungsanlagen mit Wärmepumpen projektiert und in Betrieb genommen worden. Aus diesem Grund wird immer mehr die Frage des zweckmäßigsten Einsatzgebietes von Wärmepumpen aufgeworfen. Im Versorgungsgebiet von Fernheizungen mit Wärme-Kraft-Kopplung stellen z. B. Wärmepumpen im allgemeinen keine energiewirtschaftlich günstigere Alternative dar. An allelektrisch versorgten Standorten dagegen bietet sich der Einsatz der elektrisch betriebenen Wärmepumpe an und führt zu beträchtlichen Primärenergieeinsparungen. Doch zwischen diesen beiden Einsatzgebieten liegt ein weites Feld zu bewältigender Heizungsaufgaben. In jedem Einzelfalle muß nach der volkswirtschaftlich günstigsten Lösung gesucht werden. Dabei hat die Wärmepumpe als Heizmaschine um so mehr Chancen, je besser die spezifischen Anwendungsbedingungen berücksichtigt werden.

Bekanntlich ist die Wärmepumpe, sowohl die Kompressions- als auch die Absorptionswärmepumpe (siehe Bild 1) eine Einrichtung, die einen Wärmestrom bei niedriger Temperatur (auf der kalten Seite) und außerdem den zum Betreiben notwendigen Energiestrom aufnimmt und beide Energieströme bei höherer Temperatur (auf der warmen Seite) als Wärmestrom zur Nutzung abgibt ⟨1⟩.

Damit ist die Wärmepumpe nicht nur mit der Wärmenutzungsanlage als Versorgungseinrichtung verbunden, sondern immer mit einer zusätzlichen Wärmequelle gekoppelt. Das erfordert ein völlig anderes Herangehen an die Auslegung einer Heizungsanlage.

Notwendig ist es, alle möglichen Wärmequellen zu analysieren und dabei nicht nur die Umweltenergieträger, sondern auch die unterschiedlichen Arten von Anfallenergien in Form von Abluft und Abwasser auf ihre Nutzungsmöglichkeiten zu untersuchen. Die Wärmepumpe ermöglicht eine völlig neue Art der energetischen Kopplung; sie kann rückwirkend temperaturerhöhend koppeln. Einer solchen Kopplungseinrichtung sind aber technische und ökonomische Grenzen gesetzt. Mit zunehmender Temperaturdifferenz sinkt die energetische und damit ökonomische Effektivität. Außerdem ermöglichen die serienmäßig beherrschbaren Maschinen nur die Einbindung zur temperaturerhöhenden Kopplung in ein begrenztes Temperaturfeld, insbesondere im Niedertemperaturbereich. Nicht jede Anfallenergie hat somit ein wärmepumpengerechtes Temperaturniveau. Aber auch nicht jede Wärmenutzungsanlage kann mit der Kondensatorwärme einer Wärmepumpe beheizt werden. Hinzu kommt, daß die Bedingungen der Antriebsenergie berücksichtigt werden müssen. Wärmepumpen erfordern somit eine vielschichtige Betrachtungsweise.

Im Bild 2 ist dargestellt, aus welchen Teilanlagen sich eine Heizanlage mit Wärmepumpen zusammensetzt. Neben der Wärmequellanlage – das kann eine Brunnenwasseranlage, eine Flußwasseranlage, eine Abwasseranlage, eine Solarkollektoranlage u. a. m. sein – gehören nicht nur Wärmenutzungsanlagen, sondern auch Kältenutzungsanlagen zum gesamten Anlagenkomplex. Von Bedeutung ist auch die Speicheranlage, die in vielen Fällen die Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Fahrweise schafft. Oft muß die Wärmepumpenanlage in Kombination mit einer Heizkesselanlage betrieben werden, damit es zu wirtschaftlichen Lösungen kommt.

Alle diese Teilanlagen sind auf vielfältige Art und Weise zu einer Heizanlage mit Wärmepumpen bzw. zu einer Kühl-Heiz-Anlage gekoppelt. Durch entsprechende Regelung und in Verbindung mit Energieoptimierungsgeräten auf der Mikroelektronikbasis ist die Fahrweise abgestimmmt. Erst sie führt zu solchen Primärenergieeinsparungen, die nicht nur den volkswirtschaftlichen Effekt bringen, sondern auch eine betriebsökonomische Lösung darstellen. Eine Wärmepumpe mit einer Leistung bis zu 240 kW des VEB Mafa Halle ist im Bild 3 ersichtlich.

1.2 Leistungszahlen und ihre primärenergetische Beurteilung

Eine thermodynamische und energetische Beurteilung von Wärmepumpenanlagen ist mit Hilfe der Leistungszahl möglich. Die Energiebilanz um die elektrisch betriebene Wärmepumpe im Bild 1 ergibt

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_Q + P \qquad (1)$$

wenn

$\dot{Q}_H$ = Heizleistung

$\dot{Q}_Q$ = Leistung der Wärmequellenanlage

P = Antriebsleistung.

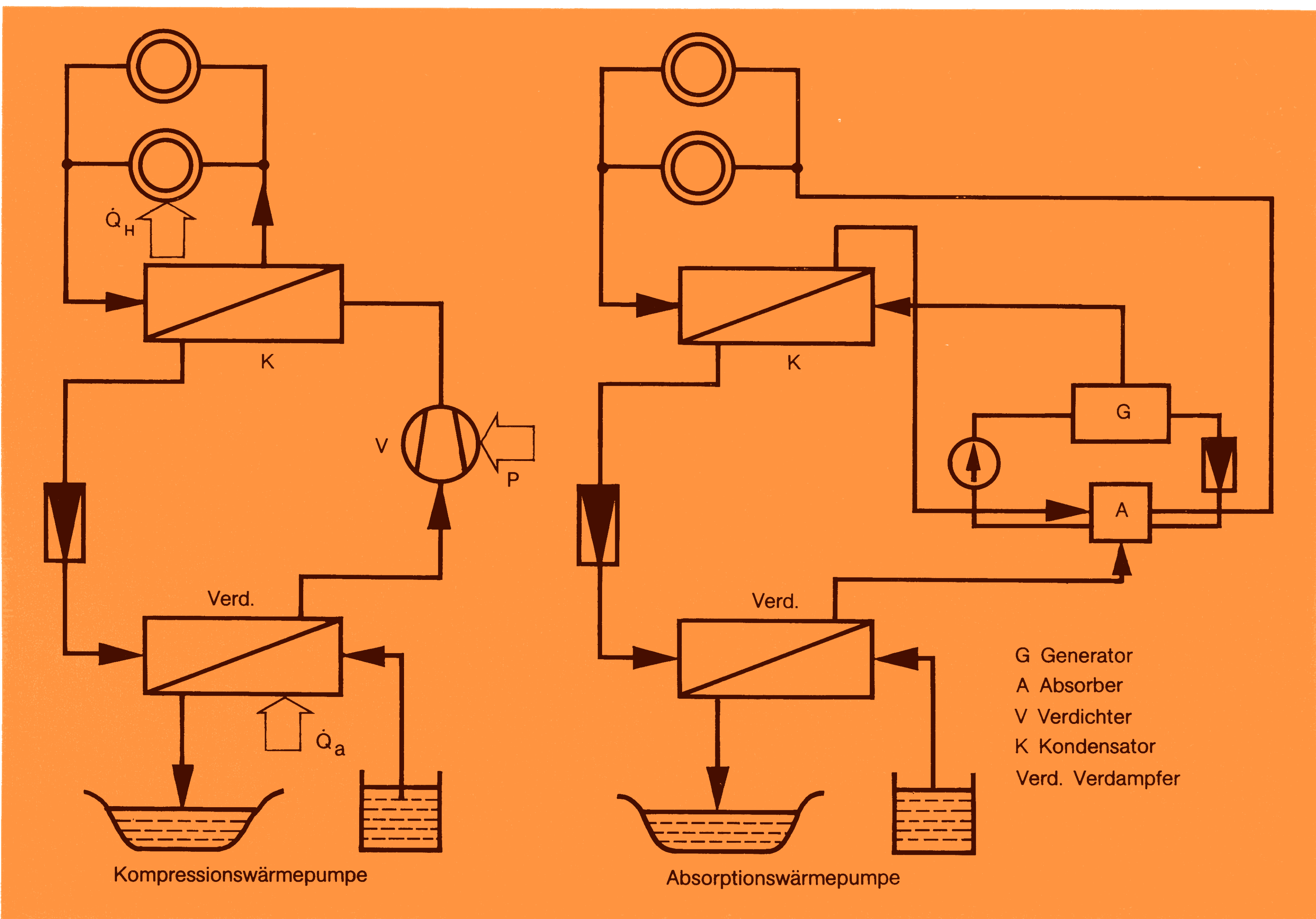


Bild 1 Prinzipbild der Heizungsanlage mit Kompressions- und Absorptionswärmepumpen

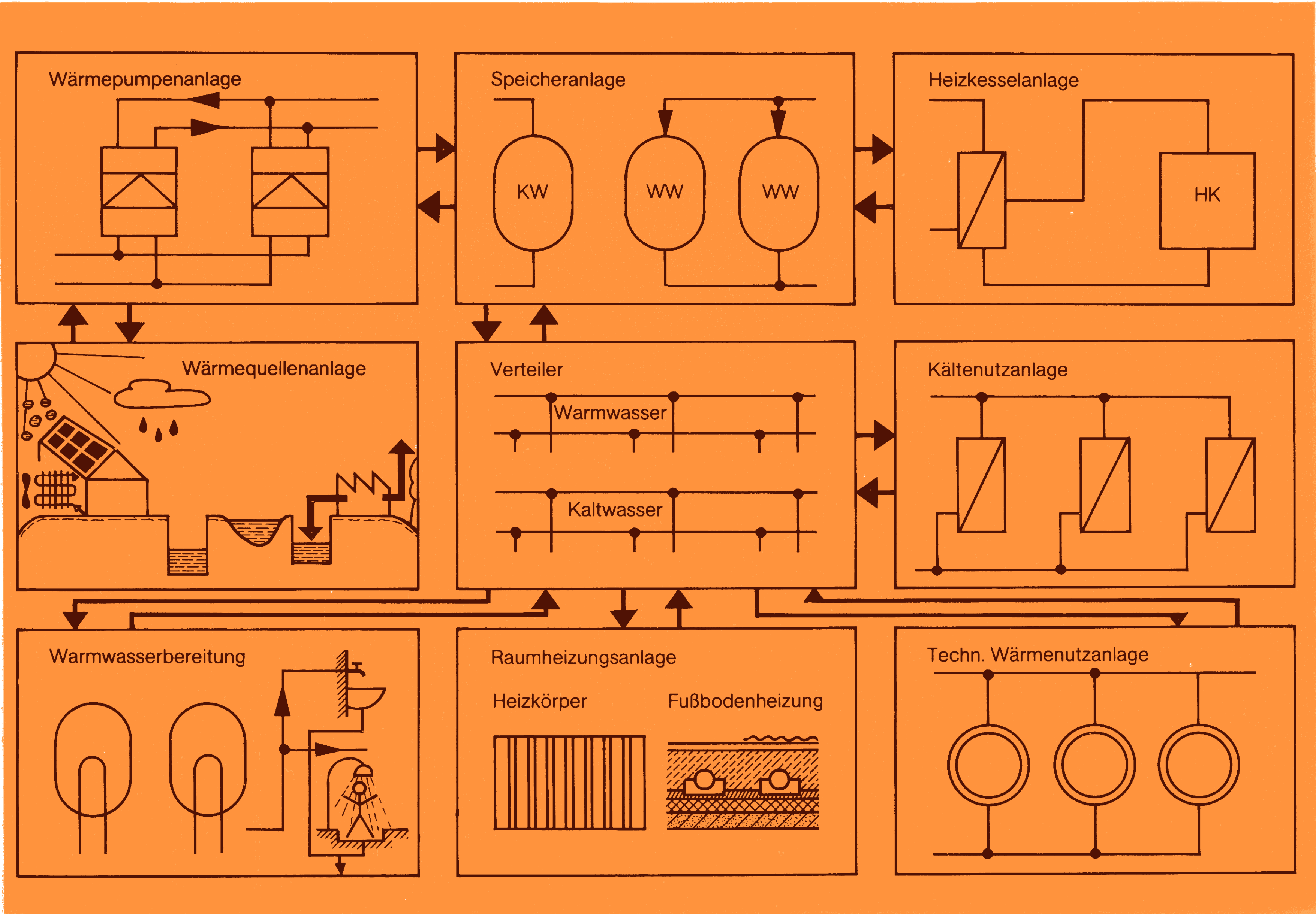


Bild 2 Heizungsanlage mit Wärmepumpen und ihre Teilanlagen

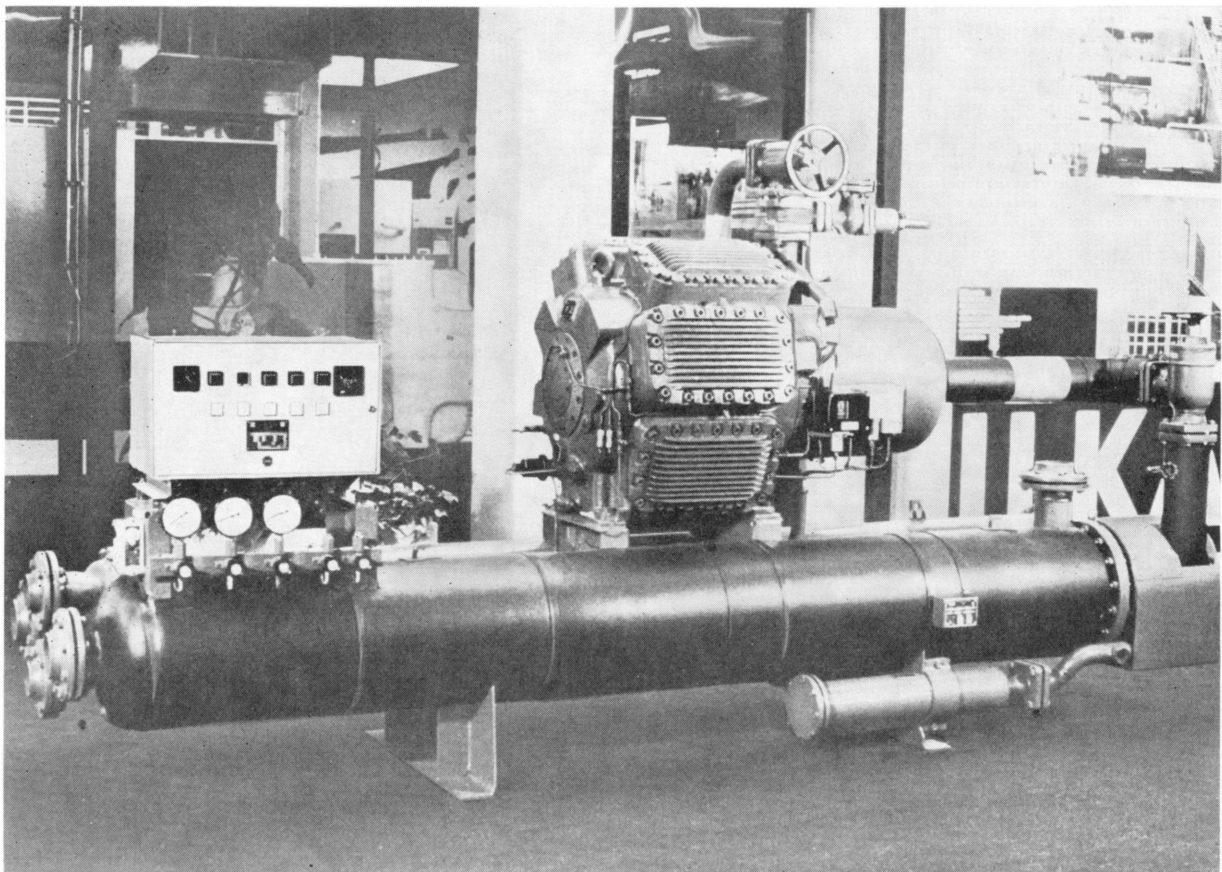


Bild 3 Wärmepumpe mit einer Leistung bis 240 kW des VEB Mafa Halle

Die Leistungszahl der Wärmepumpenanlage beträgt damit

$$\varepsilon_W = \frac{Q_H}{P} = \frac{Q_Q + P}{P} \qquad (2)$$

$$\varepsilon_W > 1$$

Für ausgeführte Anlagen ist die Leistungszahl im Bild 4 im Bereich der Kondensationstemperatur von 20...60 °C dargestellt ⟨2⟩. Wie Bild 4 zeigt, weichen die Leistungszahlen des realen Prozesses beträchtlich von den Leistungszahlen des Carnotprozesses ab. Die Leistungszahl des Carnotprozesses ε_C berechnet sich aus der Verdampfungstemperatur T_0 und der Kondensationstemperatur T_0

$$\nu_C = \frac{T}{T - T_0} \qquad (3)$$

und ist umgekehrt proportional der Temperaturdifferenz zwischen Kondensations- und Verdampfungstemperatur

$$\varepsilon_W = \nu_C \cdot \varepsilon_C = \nu_C \frac{T}{T - T_0} \qquad (4)$$

Für ausgeführte Anlagen liegt der Carnotsche Gütegrad η_C im Bereich von

$$\nu_C \sim 0{,}5 \ldots 0{,}6$$

Unter Berücksichtigung der konstruktiven Parameter des Verdampfers und Kondensators kann die Leistungszahl bei gegebener Temperatur der Wärmequelle und geforderter Temperatur der Wärmesenke bestimmt werden.

Im Bild 5 sind die Leistungszahlen bei verschiedenen Energieträgerkombinationen (W – W, W – L, L – W, L – L) in Abhängigkeit von der Temperatur der Wärmequelle und der Vorlauftemperatur des Energieträgers für die Heizung dargestellt.

Der jeweilig erste Buchstabe in der Kombination bezieht sich auf den Energieträger der Wärmequelle und der zweite Buchstabe auf den Energieträger des Heizmediums (W = Wasser und

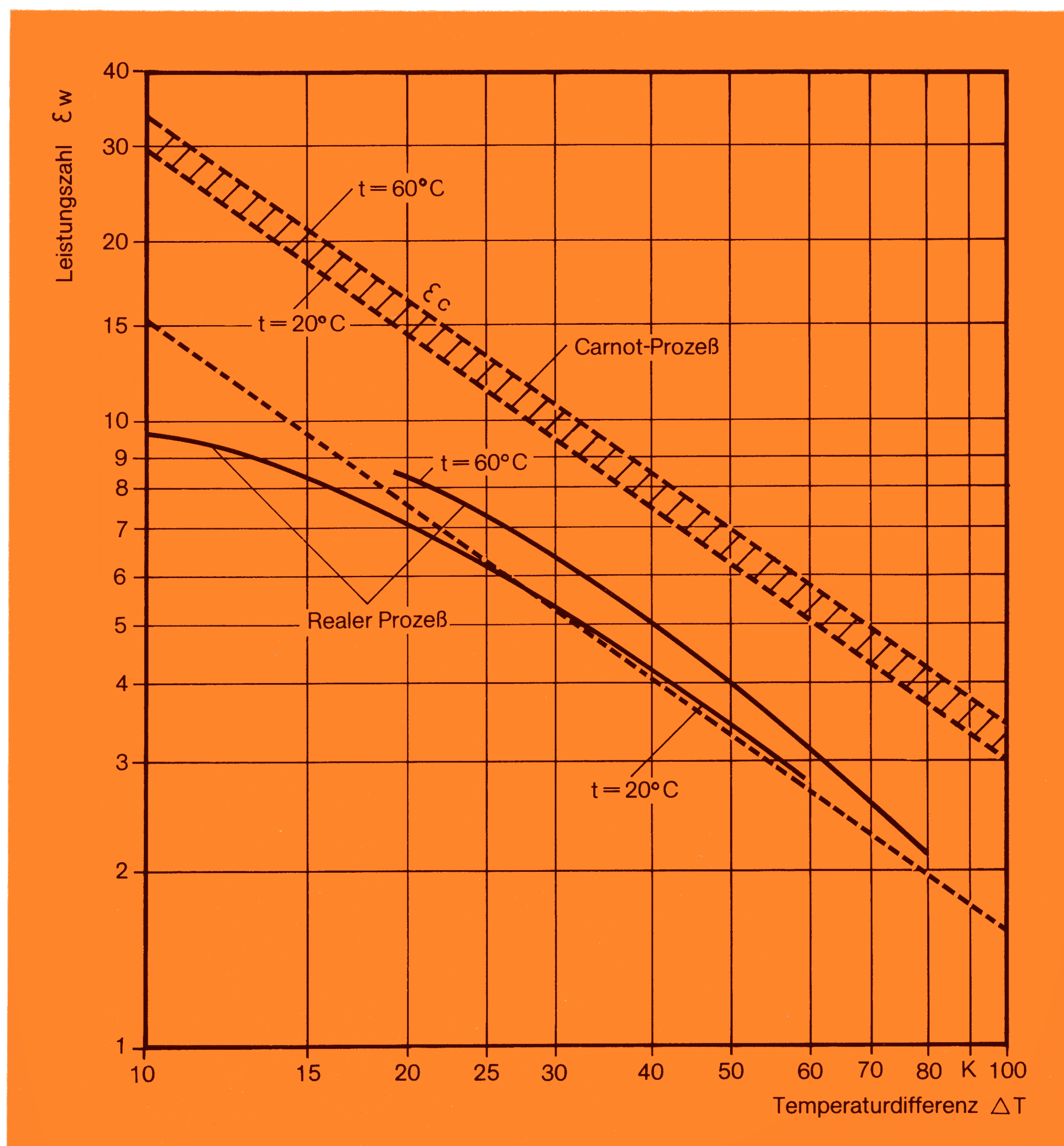


Bild 4 Leistungszahlen ε_c und ε_w
T = T − T_o

L = Luft). Je höher die Temperatur des Energieträgers der Wärmequelle ist, um so höher ist die Leistungszahl und um so geringer der Anteil an Antriebsenergie für den Wärmepumpenprozeß. Das trifft sowohl für den Energieträger Luft als auch für den Energieträger Wasser zu. Aus Bild 5 geht gleichzeitig hervor, daß hohe Leistungszahlen bei niedriger Vorlauftemperatur des Energieträgers für die Wärmesenke bzw. für die Heizung erreicht werden. Hohe Leistungszahlen erfordern damit eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizmedium.

Von Bedeutung ist die Frage, welche Leistungszahlen erreicht werden müssen, um eine volkswirtschaftlich günstige Lösung zu sichern. Eine allseitige Einschätzung aus volkswirtschaftlicher und betriebsökonomischer Sicht ist mit Hilfe der Leistungszahl nicht möglich. Der energetische Vergleich gestattet jedoch eine Beurteilung, wenn man für verschiedene Heizsysteme den Primärenergieaufwand ermittelt und diesen mit dem Primärenergieaufwand von Wärmepumpenanlagen vergleicht, wobei unter Primärenergie fossile Brennstoffe verstanden werden. Für eine derartige primärenergetische Beurteilung muß das Produkt aller Umwandlungswirkungsgrade gebildet werden. In Tafel 1 sind für verschiedene Arten der konventionellen Heizung die Primärenergieausnutzungsgrade ξ_P dargestellt.

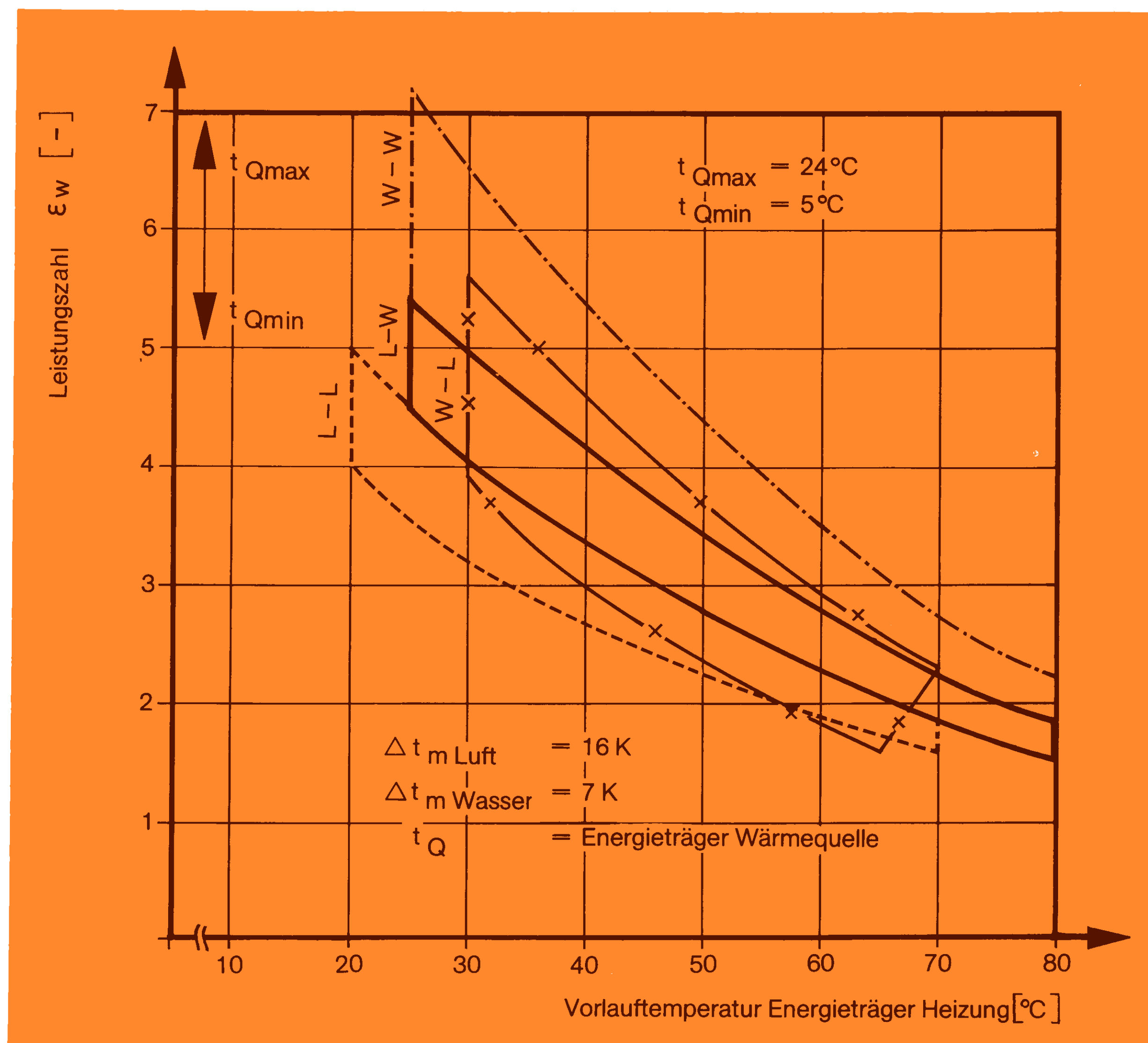


Bild 5 Leistungszahlen von Wärmepumpen bei verschiedenen Energieträgerkombinationen

Will man Wärmepumpen mit den gleichen Primärenergieausnutzungsgraden sichern, so müssen diese eine bestimmte Mindestleistungszahl aufweisen. Der Primärenergieausnutzungsgrad einer elektrischen Wärmepumpe ξ_{WPe} muß den Kraftwirkungsgrad $\eta_K = 0{,}28$ berücksichtigen:

$$\xi_{WPe} = \varepsilon_W \cdot \eta_K \qquad (5)$$

Die Mindestleistungszahl einer Wärmepumpe im Vergleich zu einer konventionellen Heizung wird unter der Bedingung

$$\xi_{WPe} = \xi_P$$

erreicht. Tafel 1 enthält die Mindestleistungszahlen zur Ablösung der einzelnen Arten der konventionellen Heizung ⟨3⟩.

Bei der Absorptionswärmepumpe ergibt sich der Primärenergieausnutzungsgrad ξ_{WPa} aus dem Wärmeverhältnis der Absorptionsmaschine ξ_A und dem Umwandlungswirkungsgrad des Heizkessels η_{HK}

$$\xi_{WPa} = \xi_A \cdot \eta_{HK} \qquad (6)$$

Das Mindestwärmeverhältnis einer Absorptionswärmepumpe beträgt damit

$$\xi_A = \frac{\xi_P}{\eta_{HK}}$$

Für den Kesselwirkungsgrad $\eta_K - 0{,}65$ sind in Tafel die Mindestwärmeverhältnisse von Absorptionswärmepumpen zur Ablösung der einzelnen Arten der konventionellen Heizung ersichtlich.

Arten der konventionellen Heizung	Primärenergieausnutzungsgrad konventionelle Heizung ξ_{P1}	Mindestleistungszahl ε_{Wmind}	Mindestwärmeverhältnis ξ_A
Elektrische Heizung	$\xi_P = \eta_K \cdot \eta_{HK} = 0{,}28 \cdot 1{,}0 = 0{,}28$	$\frac{\xi_P}{\eta_K} = \frac{0{,}28}{0{,}28} = 1$	$\frac{\xi_P}{\eta_{HK}} = \frac{0{,}28}{0{,}65} = 0{,}43$
Kesselanlage mit Stadtgasheizung	$\xi_P = \eta_G \cdot \eta_{HK} = 0{,}4 \cdot 0{,}76 = 0{,}35$	$\frac{\xi_P}{\eta_K} - \frac{0{,}35}{0{,}28} = 1{,}25$	$\frac{\xi_P}{\eta_{HK}} = \frac{0{,}35}{0{,}65} = 0{,}54$
Kesselanlage mit Kohlenfeuerung	$\eta_{HK} = \xi_P = 0{,}56$	$\frac{\xi_P}{\eta_K} = \frac{0{,}56}{0{,}28} = 2$	$\frac{\xi_P}{\eta_{HK}} = \frac{0{,}56}{0{,}65} = 0{,}86$
Moderne Kesselanlage mit Kohlenfeuerung mit Kesselleistung 10 MW	$\eta_{HK} = \xi_P = 0{,}65$	$\frac{\xi_P}{\eta_K} = \frac{0{,}65}{0{,}28} = 2{,}32$	$\frac{\xi_P}{\eta_{HK}} = \frac{0{,}65}{0{,}65} = 1{,}00$
Moderne Kesselanlage mit Kohlenfeuerung mit Kesselleistung 10 MW	$\eta_{HK} = \xi_P = 0{,}70$	$\frac{\xi_P}{\eta_K} = \frac{0{,}70}{0{,}28} = 2{,}50$	$\frac{\xi_P}{\eta_{HK}} = \frac{0{,}70}{0{,}65} = 1{,}07$

Tafel 1: Mindestleistungszahlen und Mindestwärmeverhältnisse der Wärmepumpen zur Ablösung der einzelnen Arten der konventionellen Heizung

Die wirklichen Leistungszahlen und Wärmeverhältnisse müssen größer sein als die dargestellten Mindestbedingungen, wenn jährlich eine Primärenergieeinsparung ΔE_P als volkswirtschaftlicher Effekt erreicht und mit den eingesparten Energiekosten in einer vertretbaren Zeit die Mehrinvestitionen amortisiert werden sollen.

Bei dem volkswirtschaftlichen Effekt der jährlichen Primärenergieeinsparung muß berücksichtigt werden, daß der Mehraufwand an Investitionen zugleich einen Mehraufwand an Primärenergie für die Herstellung und Installation einer Wärmepumpenheizanlage gegenüber anderen Heizungsarten erfordert. Für eine ausgeführte Wärmepumpenanlage mit einer Heizleistung von 240 kW wurde der vergegenständlichte Primärenergieaufwand ermittelt ⟨3⟩. Die Mehraufwendungen für die Wärmepumpe, die Rohrleitungen und Pumpen, das Kraftstromfeld, die Wärmerückgewinnungseinrichtung, die Bauhülle, den Förder- und den Sickerbrunnen betragen 900 MWh. Bei der jährlichen Einsparung von $\Delta E_P = 600$ MWh ergibt sich eine Rückflußdauer der vergegenständlichten Primärenergie von 1,7 Jahren. Dieser Wert liegt ein Vielfaches unter der normativen Nutzungsdauer. Wie Vergleiche mit anderen Anlagen zeigen, liegt die Rückflußdauer der Primärenergie immer deutlich unter der Rückflußdauer der Investitionen. Für volkswirtschaftliche Entscheidungen ist deshalb der ökonomische Vergleich mit Hilfe der Aufwandskennzahl anzustellen.

Nach internationalen Erfahrungen und den Erkenntnissen, die aus der Arbeit an DDR-Anlagen gewonnen wurden, ist es möglich, wirtschaftliche Heizanlagen mit Wärmepumpen auszulegen, wenn die Leistungszahl $\varepsilon_W \geq 3$ bzw. das Wärmeverhältnis $\varphi_A \geq 1{,}4$ ist.

1.3. Ökonomische Einsatzbedingungen von Wärmepumpen

Als Ausgangspunkt für volkswirtschaftliche Entscheidungen zum Wärmepumpeneinsatz sind neben dem Nachweis zur Einsparung von Primärenergie differenzierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen auf der Grundlage von Variantenvergleichen notwendig. Derartige Variantenvergleiche erfolgen mit Hilfe der Aufwandskennzahl a_{Wa}/M/Jahr/. Es wird diejenige Anlage zur Realisierung empfohlen, die die niedrigste Aufwandskennzahl aufweist ⟨4⟩.

$$a_{Wa} = J \cdot \frac{q^n (q-1)}{q^n - 1} + U (q+1) + K_M + K_L \cdot q_K \quad (7)$$

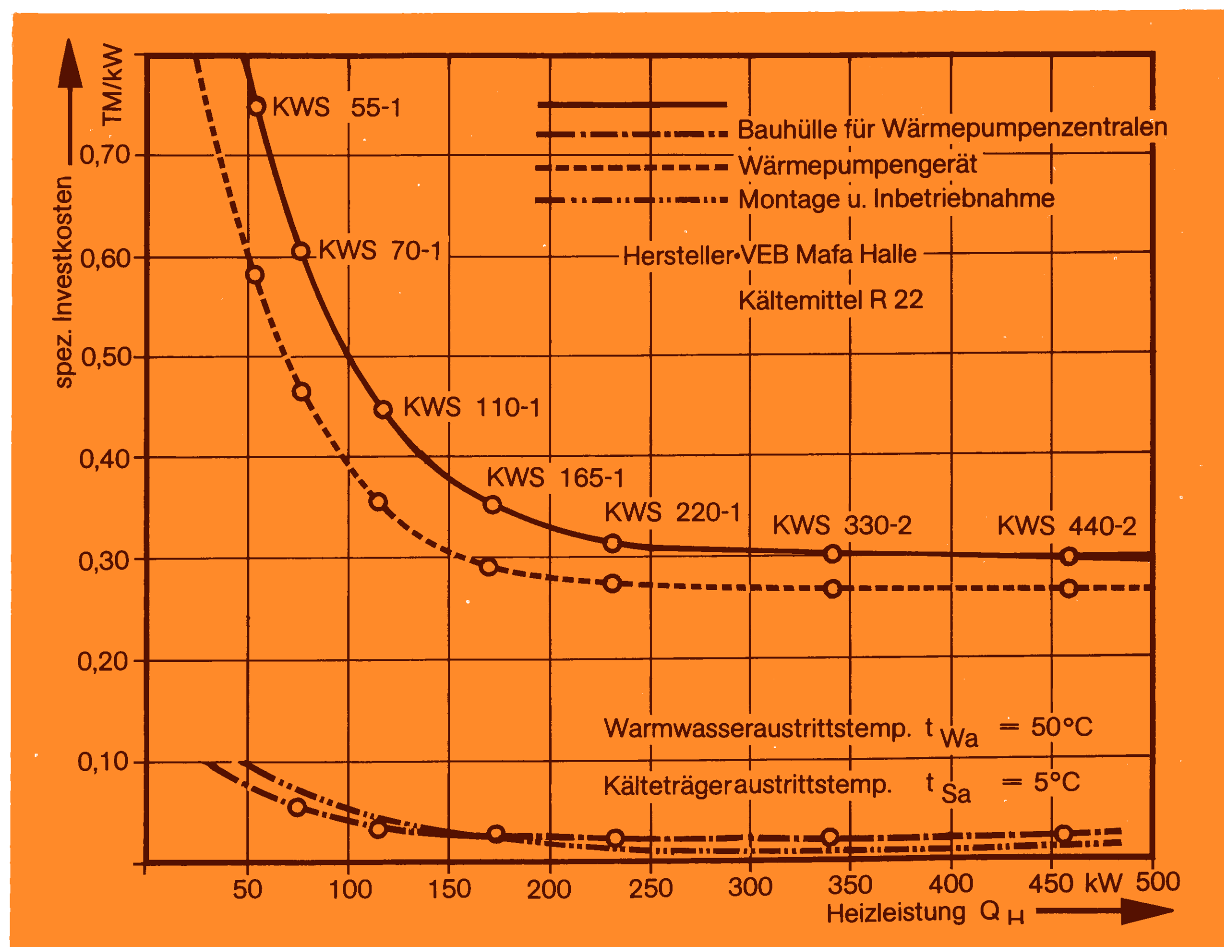
Darin sind

- J = Investitionskosten für Bau, Ausrüstung und Montage in M
- U = Umlaufmittelausstattung oder -zuführung in M (dabei U = O, wenn Investitionskosten für Wärmepumpe J_{WP} viel kleiner als Investitionskosten des Gesamtobjektes $P_{WP} \ll J_{ges}$)
- q = Akkumulationsfaktor = 1,065
- K_M = Materialkosten für Wartung, Reparatur und sonstige Kosten in M/Jahr
- n = Normative Nutzungsdauer
- K_L = Lohnkosten in M/a
- q_K = Konsumtionsfaktor (2,25 für Betrachtungszeiträume mit 1985 als mittleres Jahr).

Entscheidende Kostenelemente sind die der Investition und der Energie. Die spezifischen Investitionskosten von Wärmepumpenzentralen mit Kolbenwärmepumpen sind im Bild 6 dargestellt.

Die Heizenergie Q_H ergibt sich nach ⟨5⟩ als Produkt der Heizleistung Q_H und der Benutzungsdauer b_v. Unter der Benutzungsdauer b_v wird die Anzahl der Stunden je Jahr verstanden, die die Anlage bei Höchstleistung braucht, um jährlich eine bestimmte Arbeit zu erzeugen. Zur Ermittlung der jährlichen Primärenergieeinsparung ΔE_P der Wärmepumpenheizanlage in Abhängigkeit von der jährlichen Heizenergie Q_H und ε_W bzw. ξ_P wurden für die unterschiedlichen Arten der Heizung Arbeitsblätter aufgestellt (siehe Bilder 7 bis 10) ⟨3⟩.

Bild 6 Spezifische Investitionskosten von Wärmepumpenzentralen mit Kolbenmaschinen



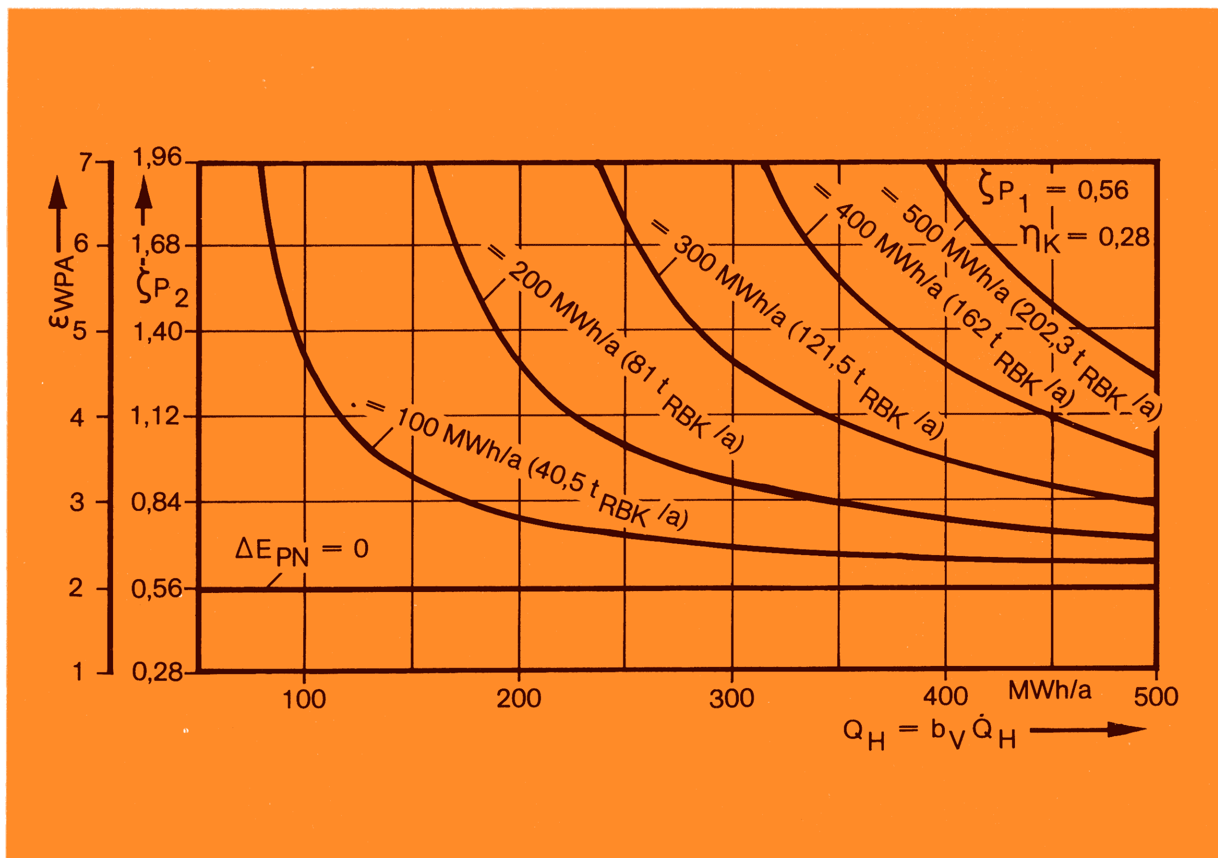
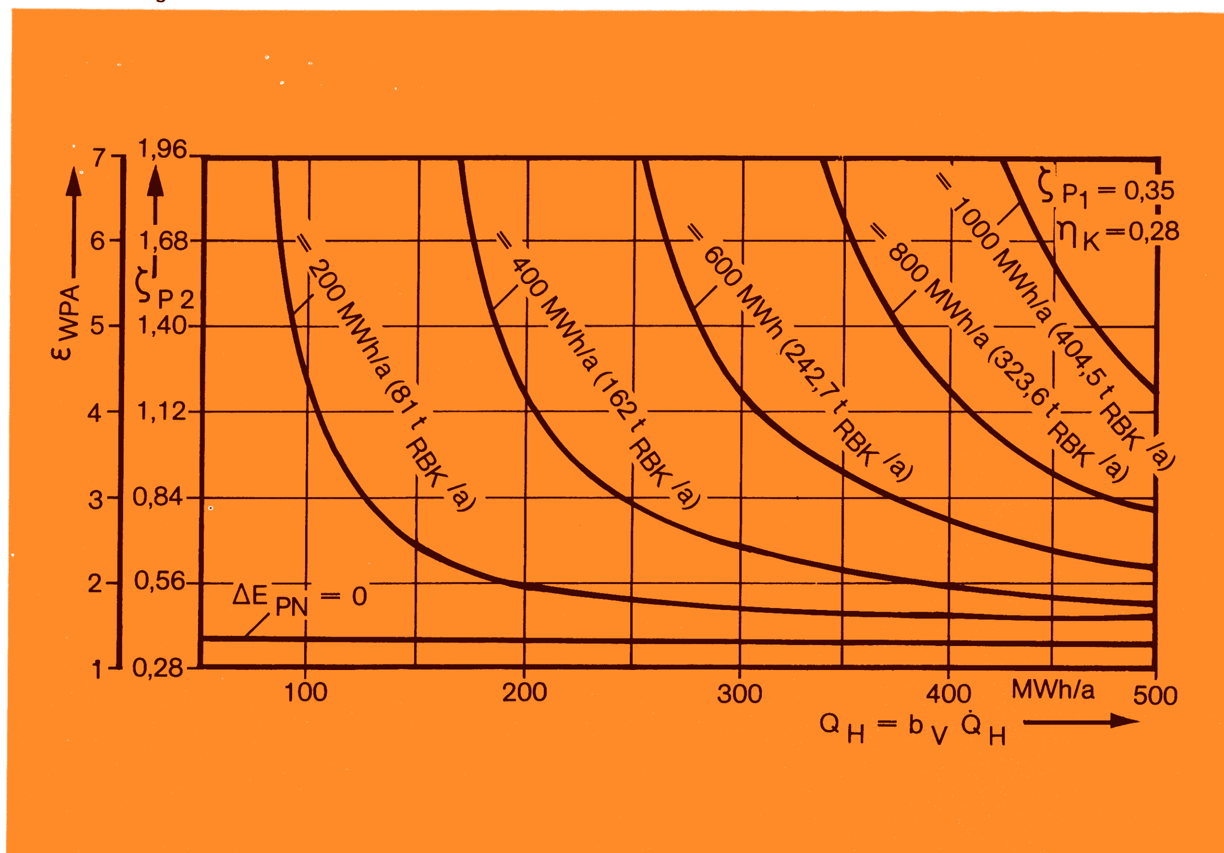


Bild 7 Jährliche Primärenergieeinsparung ΔE_P der Wärmepumpenanlage gegenüber einer elektrischen Direktheizung

Bild 8 Jährliche Primärenergieeinsparung ΔE_P der Wärmepumpenanlage gegenüber einer Kesselanlage mit Stadtgasheizung



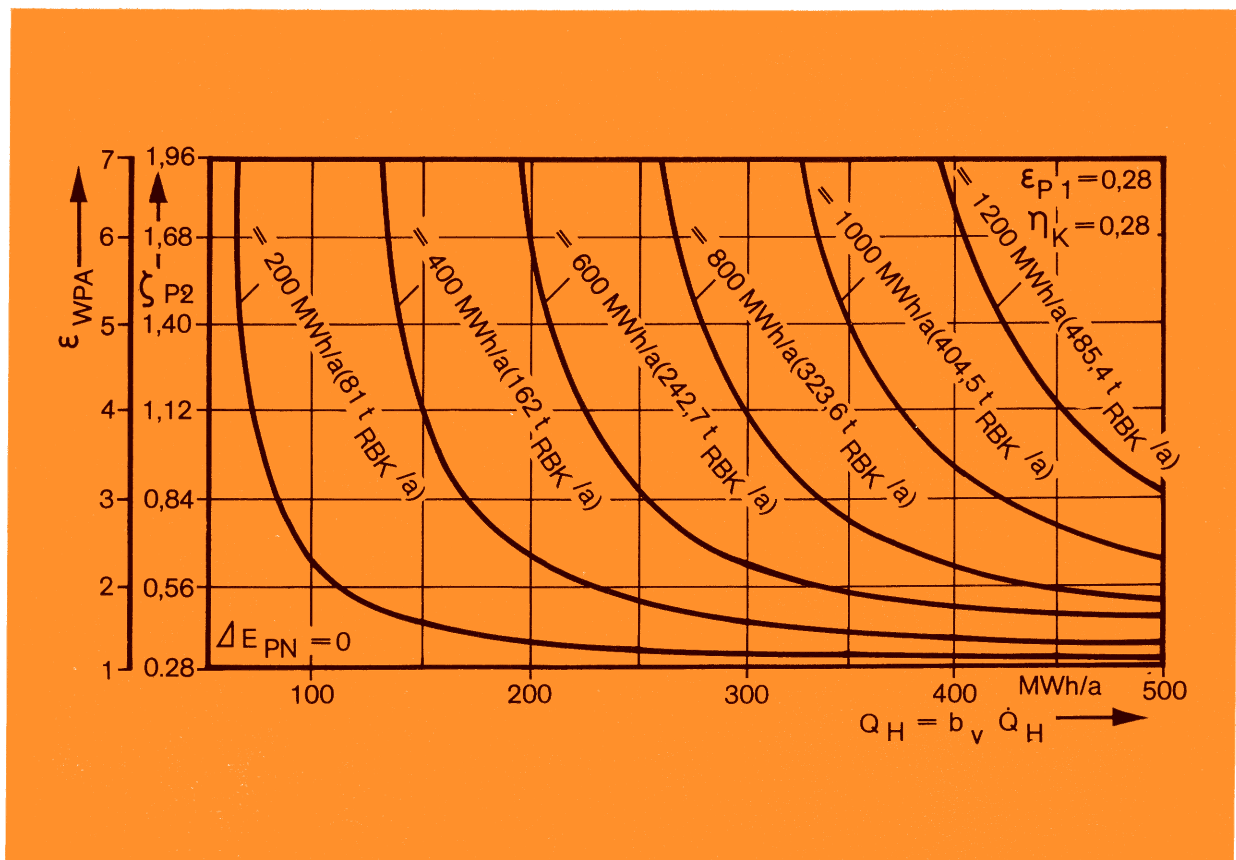
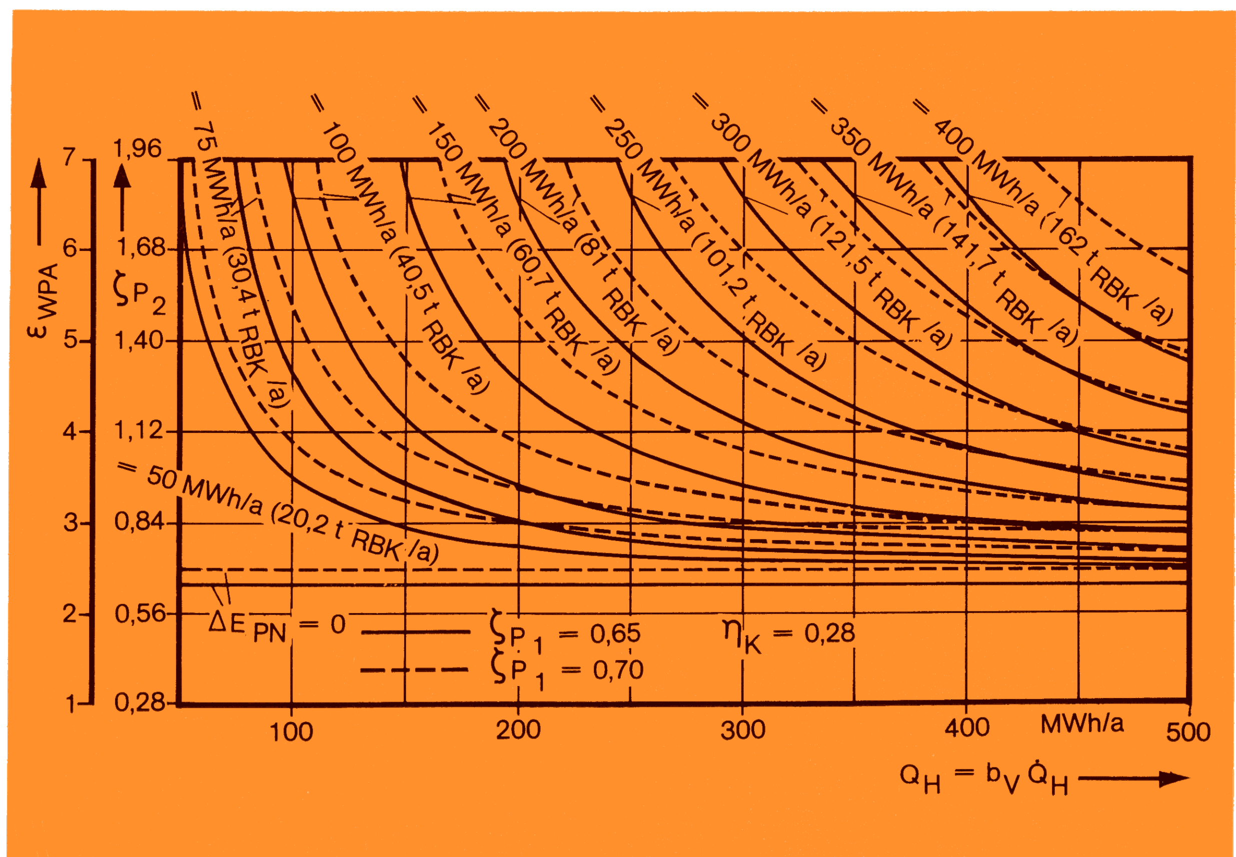


Bild 9 Jährliche Primärenergieeinsparung ΔE_P bei der Rekonstruktion einer Heizkesselanlage mit Kohlenfeuerung durch eine Wärmepumpenanlage

Bild 10 Jährliche Primärenergieeinsparung ΔE_P der Wärmepumpenanlage gegenüber einer modernen Heizkesselanlage



Die Primärenergieeinsparung wurde außer der Angabe in MWh/a mit der Beziehung

$$m = \frac{\Delta E_P}{H_u}$$

in t Rohbraunkohle je Jahr als Masseeinsparung ausgedrückt. Als unterer Heizwert H_u der Rohbraunkohle wurde der Wert 8,9 GJ/t_{RBK} verwendet.

Aus den Bildern 7 bis 10 ist zu sehen, daß bei einer gegebenen Wärmepumpenheizanlage mit einem bestimmten ε_W sich mit steigender Benutzungsdauer b_v (Vollaststundenzahl) und infolgedessen steigendem jährlichen Heizenergiebedarf auch größere jährliche Primärenergieeinsparungen erzielen lassen. Die jährlichen Primärenergieeinsparungen ΔE_P sind proportional der Erhöhung der Benutzungsdauer.

Für die Ermittlung der Aufwandskennzahl ist es von entscheidender Bedeutung,

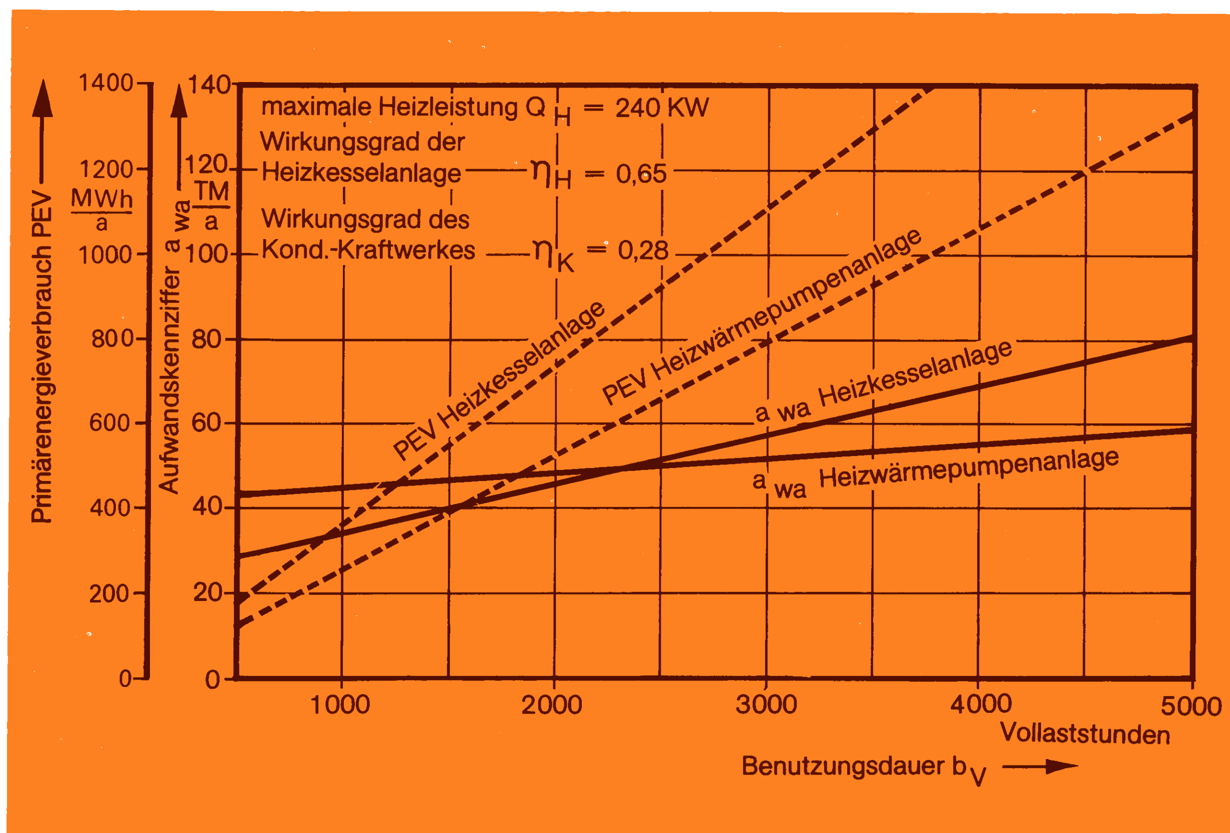
- die richtigen Bilanzgrenzen und
- die richtige Zuordnung der Kostenelemente,

insbesondere hinsichtlich der Entscheidung des Mehraufwandes, zu sichern.

Bei der Wahl der Bilanzgrenzen müssen traditionelle Zuständigkeiten überwunden werden. Der Einsatz einer Wärmepumpenheizung als einfacher Ersatz für eine konventionelle Heizung führt nur in den seltensten Fällen zu einer wirtschaftlichen Anlage. Alle Wärmequellen und -senken eines Objektes müssen erfaßt und daraus die Bilanzgrenzen abgesteckt werden. Innerhalb der Bilanzgrenzen befinden sich in vielen Fällen die Teilanlagen der

Lüftung mit Wärmerückgewinnung
Heizung
Kälteversorgung
Wasserversorgung
Wasserentsorgung
Abproduktbeseitigung.

Bild 11 Ökonomische und energetische Bewertung von Heizungsanlagen in Abhängigkeit von der Benutzungsdauer



Mit Festlegen der Bilanzgrenzen für den Vergleich konventioneller Anlagen mit Wärmepumpenanlagen wird über den Umfang der Kosten- und Nutzenselemente für die Ermittlung der Gesamtkosten entschieden.

Liegt der Umfang der Kosten- und Nutzenselemente im Rahmen der Bilanzgrenzen fest, ist es erforderlich, die differenzierte innere Struktur real zu erfassen. Bei den festen und variablen Kosten sind eindeutig die direkt zurechenbaren Kosten für die Berechnung zu eliminieren. Soll z. B. eine Abluftanlage als Wärmequelle genutzt werden, so sind neben dem Mehraufwand für den Verdampfer der Wärmepumpe auch die erhöhten festen und variablen Kosten für Förderung der Abluft zu erfassen. Berücksichtigt werden darf jedoch nur der Mehraufwand an Investitionen und an Energiekosten, der durch den Druckverlust im Wärmeübertrager erforderlich ist.

Nicht zu unterschätzen ist der Umstand, daß sich durch den höheren Automatisierungsgrad der Wärmepumpen als Bestandteil der variablen Kosten, die Lohnkosten verringern.

Die Energiekosten müssen im Rahmen der variablen Kosten, getrennt nach den Tarifen, insbesondere jedoch nach dem Anteil des Nachtstromtarifs, erfaßt werden, um die Effekte der Speicherung ausweisen zu können.

Verhältnismäßig einfach ist die Ermittlung der Energiekosten und der jährlichen Betriebsstundenzahl, bezogen auf Q_{ges}, bei zeitlich konstanter Belastung, wie das z. B. bei technologischen Wärmesenken vorkommen kann. Zeitlich schwankende Belastungen müssen jedoch sowohl im Energieverbrauch als auch im Nutzen, ausgedrückt durch das Produkt ($Q_H \cdot b$), differenziert betrachtet werden. So ist z. B. bei Raumheizungen die Heizlast von den Außentemperaturen abhängig, und das Produkt ($Q_H \cdot b$) wird vom gewogenen Mittel der Häufigkeit der Außentemperaturen bestimmt. Der Energieverbrauch wird in gleicher Weise beeinflußt, aber letzten Endes erst durch das Teillastverhalten der Wärmepumpenanlage, durch den Verlauf der Temperaturen der Wärmequelle und die Benutzung von Speichern bestimmt.

Differenzierte Betrachtungen sind auch bei der Kälte-Wärme-Kopplung erforderlich.

Beim Alternativbetrieb (wechselseitige Kälte-Wärme-Nutzung) ist eine getrennte Ermittlung der spezifischen Gesamtkosten je Einheit Kälte- und Heizenergie möglich.

Die Ermittlung der Aufwandskennzahl zwingt oft zu zusätzlichen Maßnahmen, um den Effekt der Primärenergieeinsparung mit einer Variante zu sichern, die zugleich einen niedrigen ökonomischen Aufwand aufweist. Wie aus den Bildern 7 bis 10 hervorgeht, kann die Wirtschaftlichkeit insbesondere durch eine hohe Benutzungsdauer verbessert werden. Im Bild 11 wurde ein Variantenvergleich für eine Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 240 kW im Vergleich zu einer konventionellen Anlage dargestellt. Erst nach einer hohen Benutzungsdauer liegt die Aufwandskennzahl der Wärmepumpenanlage unter der einer Heizkesselanlage.

Ein entscheidendes Prinzip besteht somit darin, durch zweckmäßige Ankoppelung von Wärmenutzungsanlagen in der Übergangsperiode und im Sommer sowie durch die Ankoppelung von Kältenutzungsanlagen eine hohe Benutzungsdauer zu sichern.

1.4. Einflußgrößen auf die Leistungszahl und Einsatzbedingungen

Die Leistungszahl einer Heizanlage mit Wärmepumpe ε_W wird, wie in ⟨6⟩ nachgewiesen wurde, von den Bedingungen und Irreversibilitäten in der Anlagenkette zwischen Wärmequelle und Raumtemperatur und den Verlusten des realen Wärmepumpenprozesses im Vergleich zum Carnot-Prozeß beeinflußt. Damit sind die Irreversibilitäten und der Gütegrad des Verdichters auf die Leistungszahl wirkende Einflußgrößen.

In ⟨6⟩ wird aufgezeigt, daß die in Tafel 2 aufgeführten 7 Einflußgrößen über die Beziehung

$$\varepsilon_W = \nu_C (T_0, T_1, \nu_{C-K}) \frac{T_1}{T_1 - T^o} \qquad (8)$$

die Leistungszahl bestimmen. Außerdem enthält Tafel 2 den Bereich der thermodynamischen Güte der Einflußgrößen bei den Energieträgern Wasser und Luft. Tafel 3 zeigt die Empfindlichkeit von ε_W bezüglich dieser 7 Einflußgrößen.

Für einen vorgefertigten Wärmepumpensatz sind die Bedingungen für die Einflußgrößen der Anlagenkomponenten Verdampfer, Verdichter und Kondensator durch die Auslegung gegeben. Kleinere Temperaturdifferenzen zwischen der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur können mit großen Wärmeübertragern oder mit stufenweiser Erwärmung (Annäherung an den Lorenz-Prozeß) erreicht werden.

Anlagen-komponente	Einflußgröße	Energieträger Wasser	Energieträger Luft
Wärmequelle	Wärmequellentemperatur T_{vo}	281 ... 303 K	277 ... 293 K
Zwischenwärme-übertrager	m. log. Temperaturd. ΔT_{mwo}	5 ... 10 K	–
Verdampfer	m. log. Temperaturd. ΔT_{mo}	6 ... 10 K	10 ... 15 K
Verdichter	Gütefaktor f_K	0,9 ... 1,1 K	0,9 ... 1,1 K
Kondensator	m. log. Temperaturd. ΔT_{mt}	8 ... 15 K	9 ... 15 K
Speicher	Temperaturdifferenz ΔT_S	0,2 ... 1 K	–
Heizkörper	mittlere Übertemperatur ΔT_{mt-R}	7 ... 37 K	5 ... 22 K

Tafel 2: Bereich der thermodynamischen Güte der Einflußgrößen

Anlagen-komponente	Einfluß-größe	Flächenheizung mit Wärmepumpe ε_W L–W	Flächenheizung mit Wärmepumpe ε_W W–W	Flächenheizung mit Wärmepumpe ε_W W (W)–W	Luftheizung mit Wärmepumpe ε_W W–W (L)	Luftheizung mit Wärmepumpe ε_W L–L
Wärmequelle	T_{vo}	0,78	1,78	1,27	2,62	1,84
Zwischenwärme-übertrager	ΔT_{mu}	–	–	0,29	–	–
Verdampfer	ΔT_{mo}	0,27	0,35	0,25	0,49	0,58
Verdichter	f_K	0,47	0,63	0,53	0,77	0,79
Kondensator	ΔT_{mt}	0,34	0,57	0,41	0,83	0,69
Speicher	ΔT_S	0,04	0,07	0,05	0,10	–
Heizkörper	ΔT_{mt-R}	1,62	2,61	1,88	2,07	–

Tafel 3: Änderungsbereich der Leistungszahl ε_W durch die Auslegungsgüte der Anlagenkomponenten bei verschiedenen Schaltungen

Die maximal zulässige Kondensationstemperatur begrenzt die Temperatur der warmen Seite der Wärmepumpe; der Kondensationsdruck wiederum (bedingt durch die Konstruktion des Verdichters und die Wahl des Kältemittels) bestimmt die Kondensationstemperatur.

Einen Einfluß auf die Leistungszahl der Heizungsanlage mit Wärmepumpen übt insbesondere die Fahrweise im Teillastgebiet aus. Bei veränderlichen Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke verändern sich jeweils die Belastung der Wärmepumpe und die Leistungszahl. Die Auslegung der Wärmepumpe mit Leistungsregulierung und einem entsprechend hohen Teillastwirkungsgrad des Verdichters und des Motors bzw. mehrere, zur besseren Anpassung an den schwankenden Bedarf parallelgeschaltete kleinere Wärmepumpen, beeinflussen in beträchtlichem Maß die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen.

Der Einsatz von Wärmepumpen ist jedoch nicht nur von wirtschaftlichen Faktoren abhängig, sondern auch von den Bedingungen, die eine hohe Zuverlässigkeit gewährleisten. Die Zuverlässigkeit und Servicefreundlichkeit sind um so höher, je weniger die Wärmepumpen von den serienmäßig erzeugten Baueinheiten der Kältesätze abweichen.

Eine wärmepumpengerechte Gestaltung von Heizungsanlagen kann insbesondere durch die Wahl des Heizungssystems und damit der Heizkörper erreicht werden. Bei der Empfindlichkeitsanalyse wurde die Vorlauftemperatur des Heizmediums zwischen 30 und 65 °C variiert. Durch Niedertemperaturheizsysteme bis zu $T_{Vo} \leq 45$ °C kann die Leistungszahl entscheidend verbessert werden. Eine wärmepumpengerechte Gestaltung ist auch durch die Wahl der Wärmequelle und Vermeiden von Zwischenwärmeübertragern möglich.

Nach Auswerten der primärenergetischen Beurteilung, der Untersuchungen zu den ökonomischen Bedingungen, insbesondere einer hohen Vollaststundenzahl und Empfindlichkeitsanalyse der Leistungszahl bezüglich der Einflußgrößen können die Einsatzbedingungen für Wärmepumpen bestimmt werden.

Für volkswirtschaftlich effektive Wärmepumpenanlagen sind folgende Aktivitäten unabdingbare Voraussetzung:

– Eingehende Analyse von Wärmequellen und Wärmesenken
– Wärmepumpengerechte Gestaltung von Niedertemperatur-Wärmebedarfsträgern
– Übergeordnete Entscheidungen zur territorialen Zuordnung von passenden Wärmebedarfsträgern zu Orten mit Abwärme oder von Kältebedarfsträgern zu günstigen Wärmepumpenstandorten.

Es ist zweckmäßig, Wärmepumpen in solchen Objekten einzusetzen, bei denen eine Kälte-Wärme-Kopplung möglich ist oder bei denen Abwärme aus dem technologischen Prozeß oder Wärmeträger natürlicher Energiequellen vorhanden sind. Diese müßten eine solche Temperatur haben, daß sie bei geringer Temperaturerhöhung in Form der Niedertemperaturheizung nutzbar gemacht werden können.

Diese grundsätzliche Einsatzempfehlung für Wärmepumpen läßt sich in einer Reihe differenzierter Bedingungen für den bevorzugten Wärmepumpeneinsatz aufgliedern, die – einzeln oder kombiniert – hohe Leistungszahlen und damit eine gute Wirtschaftlichkeit ermöglichen. Tafel 4 zeigt in einer Übersicht die Einsatzbedingungen für Wärmepumpen.

Die dargestellten Bedingungen für den bevorzugten Wärmepumpeneinsatz erleichtern die Auswahl von Objekten für den wirtschaftlichen und zuverlässigen Einsatz von Wärmepumpen. Ihre kombinierte Anwendung ermöglicht es, die systembezogenen Bedingungen des Wärmepumpenprozesses mit den Anwenderbedingungen in Übereinstimmung zu bringen.

Die Einsatzbedingungen für Wärmepumpen stellen zugleich die Grundlage für die energetische Prozeßanalyse dar. In der Prozeßanalyse sind die einzelnen Bedingungen schrittweise durchzuarbeiten und damit, so weit möglich, Voraussetzungen für eine wärmepumpengerechte Gestaltung von Objekten zu schaffen.

Tafel 4: Einsatzbedingungen für Wärmepumpen bei der Prozeßanalyse

Objekte mit wärmepumpengerechten Niedertemperaturwärmebedarf

- Objekte mit Niedertemperatur-Raumheizung
- Objekte mit Niedertemperatur-Brauchwarmwasser
- Objekte mit Vorwärmung höher temperierten Brauchwassers
- Objekte mit technologischen Niedertemperaturwärmebedarf

Objekte mit wärmepumpengerechten Umweltbedingungen

- Objekte an Oberflächengewässern
- Objekte an gut erschließbaren Grundwasser
- Objekte mit Wasserentnahme aus dem öffentlichen Netz
- Objekte mit geringer Bebauungsdichte für Erdreichwärmeübertrager
- Objekte mit großflächigen Überdachungen
- Objekte mit Nutzung von Außenluf als Wärmequelle
- Objekte an geothermischen Energieträgern

Objekte mit wärmepumpengerechten technologischen Bedingungen

- Objekte mit abkühlbaren Wasserbedarf
- Objekte mit abkühlbaren Kreislaufwasser
- Objekte mit gleichmäßigen Anfall von Niedertemperaturabwasser
- Objekte mit gleichmäßigen Anfall von Abluft
- Objekte mit Entfeuchtungstechnologien

Objekte mit Kälte-Wärme-Kopplung

- Gleichzeitige Kälte-Wärme-Kopplung
- Wechselseitige Kälte-Wärme-Kopplung
- Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicherung
- Kälte-Wärme-Kopplung mit integrierten Versorgungsnetz

Schaltungen mit eingekoppelten Ausrüstungen

- Einkoppelung von Speichern
- Einkoppelung von Wärmeübertragern
- Einkoppelung von Spitzenlastheizungen

Objekte mit wärmepumpengerechter Antriebsenergie-Versorgung

- Objekte mit einschieniger Elektroenergieversorgung
- Objekte mit begrenzter Leistung in der Elektroenergie-Spitzenzeit
- Objekte mit nutzbarer Hochtemperaturabwärme
- Objekte mit Heizkesseln nahe von Umwelt- und Abwärmequellen

2. Objekte mit wärmepumpengerechten Niedertemperaturwärmebedarf

2.1. Objekte mit Niedertemperatur-Raumheizung

Die Vorlauftemperatur des Heizsystems beeinflußt entscheidend die Leistungszahl und somit die wirtschaftliche Auslegung von Wärmepumpenanlagen. Als Wärmeträger für die traditionell üblichen Heizkörper im Wohnungs- und Gesellschaftsbau wird im überwiegenden Maß Warmwasser mit Temperaturen von 90 °C, teilweise bis 110 °C, in Industriebauten zum Teil auch Dampf, eingesetzt. In diesem Bereich der Vorlauftemperaturen ist der wirtschaftliche Einsatz von Wärmepumpen nicht möglich. Die Anwendung von Wärmepumpen setzt Niedertemperaturheizungen voraus. „Der Begriff der ‚Niedertemperatur' wurde von den bei Flächenheizungen auftretenden Oberflächentemperaturen abgeleitet, die deutlich unter den von der Siedetemperatur des Wassers bei atmosphärischen Druckverhältnissen diktierten Oberflächentemperaturen der Rohr- und Gliederheizkörper liegen." ⟨7⟩.

Wärmepumpenanlagen mit 60 °C Vorlauftemperatur führen zu Leistungszahlen, die im Grenzbereich wirtschaftlich vertretbarer Leistungszahlen liegen (teilweise darunter). Deshalb ist es Ziel einer wärmepumpengerechten Gestaltung von Heizungsanlagen, Vorlauftemperaturen zu verwirklichen, die bei 45 °C oder darunter liegen.

Die wärmepumpengerechte Gestaltung der Vorlauftemperaturen geht aus von der Beziehung

$$Q_{H} = \alpha \cdot A\,(T_{HF,\,m} - T_{R}) \qquad (9)$$

Im Sinne einer Niedertemperaturheizung können in dieser Gleichung folgende Größen beeinflußt werden:

– Die Heizleistung Q_{H} ist zu verringern

– die wärmeabgebende Fläche A ist zu vergrößern.

Eine Verringerung der Heizleistung Q_{H} ist von außerordentlicher Bedeutung. Die Auslegung von Wärmepumpenanlagen beginnt immer mit der Analyse von Maßnahmen zur Verringerung der Heizleistung. Da die Größe der wärmeabgebenden Fläche begrenzt ist, wärmephysiologische Grenztemperaturen einzuhalten sind und zu große Heizflächen zu hohe Mehrkosten verursachen, gilt es, das Ziel zu verwirklichen, daß die Wärmelast und damit die Heizleistung auf Werte von 80 bis 90 W/m^2 verringert wird.

Fugendichte Gebäudegestaltung

Durch geringere Wärmedurchgangszahlen, d. h. besser isolierte Wände, wird die Wärmelast reduziert. Bei neu zu errichtenden Gebäuden muß das beachtet werden. Bei Neubauten und Rekonstruktionen von Altbauten läßt sich jedoch die Wärmelast entscheidend verringern, indem wärmedichter gebaut oder nachträglich abgedichtet wird. Der Fensterflächenanteil muß zweckmäßig ausgelegt werden; fugendichte Fenster und Türen und richtiges Abdichten aller Wanddurchbrüche helfen, die unkontrollierte Lüftung zu reduzieren.

Wärmepumpengerechtes Gestalten von Objekten beginnt mit zielgerichteten Veränderungen an Gebäuden, besonders in bezug auf Wärmedichte.

Wärmerückgewinnung aus der Abluft

Auch geringerer Lüftungswärmebedarf bei kontrollierter Lüftung trägt zu verringerter Heizleistung bei. Durch Wärmerückgewinnung aus der Abluft ist mit Regeneratoren ein Energierückgewinnungsgrad bis zu 70 % und mit dem rekuperativen Zirkulationssystem bis zu 45 % möglich. Im gleichen Umfang reduziert sich der Lüftungswärmebedarf. Der Einsatz von Regeneratoren und Rekuperatoren zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft ist beim Einsatz von Wärmepumpen immer in die Betrachtung einzubeziehen. Selbst dann, wenn die Abluft als Wärmequelle verwandt wird, kann es zweckmäßig sein, Regeneratoren vorzuschalten und damit eine zweistufige Abwärmenutzung zu verwirklichen.

Lokale Klimagestaltung und Heizung

Große Räume werden oft für Raumluftzustände ausgelegt, die nur an wenigen Stellen des Raumes benötigt werden.

In ausgedehnten Räumen mit begrenzten Aufenthaltszonen sind durch örtlich differenzierte auf den Arbeitsplatz oder Wirkungsbereich bezogene Festlegung der Raumlufttemperatur, d. h. lokale Klimagestaltung und Heizung, erhebliche Einsparungen an Auslegungsleistung und damit an Energie möglich. Außerhalb der lokal gestalteten Bereiche können auf diese Weise z. B. wesentlich niedrigere Raumtemperaturen festgelegt werden. Die lokale Klimagestaltung und Heizung ist in der Regel bei Anteilen der örtlich differenzierten Raumtemperaturbereiche zu der Fläche des Gesamtraumes bis zu 20 % zweckmäßig. In solchen Fällen wirkt die lokale Klimagestaltung im beträchtlichen Maße reduzierend auf die Auslegungsleistung; Werte bis zu 35 % Leistungsverringerung sind möglich.

Sparbetrieb bei Spitzenbelastung

Die Heizleistung wird in der Regel so bemessen, daß auch bei extremen Bedingungen in der Spitzenbelastung die vorgegebenen Raumluftparameter eingehalten werden. Die Heizanlagen werden mit einer Reserve ausgelegt, die nur wenige Stunden im Jahr ausgenutzt wird. Durch Raumluftzustände, die einen geringeren Leistungsbedarf erfordern und nur wenige Stunden im Jahr zugelassen werden, ist eine Reduzierung der Heizleistung möglich. Solche Raumluftzustände lassen sich verwirklichen, indem die Raumtemperaturen niedriger gehalten oder die Förderströme zur Lufterneuerung verringert werden. Abhängig vom jeweiligen Objekt und von der Lastspitzencharakteristik läßt sich durch Vereinbarung einer vertretbaren Überschreitungswahrscheinlichkeit bzw. eines größeren Toleranzfeldes der Raumluftparameter die Auslegungsleistung bis zu 20 % senken, ohne daß die Überschreitungswahrscheinlichkeit 80 Stunden übersteigt.

Vergößerung der wärmeabgebenden Heizflächen

Vergrößert man die wärmeabgebenden Flächen, lassen sich die bekannten Heizgeräte oder örtliche Flächenheizungen im Niedertemperaturbereich einsetzen. Da die niedrige Vorlauftemperatur bei den bekannten Geräten und Heizkörpern ein Sinken der spezifischen Heizleistung bewirkt, ist eine entsprechend größere Zahl von Geräten oder Heizkörpern zu installieren. Bild 12 zeigt in einer Übersicht die bekannten Heizsysteme und ihre Leistung im Niedertemperaturbereich; im Bild 12 ist die Fußbodenheizung ersichtlich, die eine der Anwendungsformen der Niedertemperaturheizungen darstellt.

Niedertemperatur-Luftheizungen

Die Anwendungsmöglichkeiten einer Luftheizung mit Niedertemperatur-Heizmedien auf der Basis von Wärmepumpenschaltungen soll im Vergleich zu den bisher üblichen Heizmethoden mit einer Temperaturspreizung von 90/70 °C und zu anderen Niedertemperatur-Heiz-Systemen betrachtet werden; es wird von einer Vorlauftemperatur 45 °C ausgegangen.

Klimablöcke (VEB LTA Berlin)

Da die Größe des Lufterhitzers vom Luftförderstrom, der Lufterwärmung und der Temperatur des Heizmediums abhängig ist, werden für die gleiche benötigte Heizleistung sowohl die erforderliche Heizfläche als auch der Luftförderstrom größer. Dies ist bedingt durch die Wärmelast des Raumes. Wegen der geringen Temperaturdifferenzen wird gegenüber der Fahrweise 90/70 °C die Niedertemperatur-Heizung angewandt. Je nach Raumlast und Fahrweise der Anlage (Außenluftanteil, Art der Luftführung u. a.) muß im allgemeinen mit dem Faktor 1,5 ... 3,0 für die Vergrößerung von Förderstrom und Wärmeübertragungsfläche gerechnet werden. Verringert sich z. B. die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_R = \vartheta_Z - \vartheta_R$ (ϑ_Z = Zulufttemperatur, ϑ_R = Raumlufttemperatur) um den Faktor 3 (z. B. Niedertemperatur-Medium: $\Delta\vartheta_R = 10$ K, Hochtemperatur-Medium: $\Delta\vartheta_R = 30$ K), so müssen die Wärmeübertragerfläche und der Luftförderstrom verdreifacht werden.

Eine Verringerung dieses Faktors tritt im allgemeinen dadurch ein, daß der Außenluft-Förderstrom und damit der Antrieb der Außenluftaufheizung konstant bleiben.

Bei Einsatz von in der DDR produzierten autarken Geräten zur Lufterwärmung, wie z. B. der Decken- oder Wandlufterhitzer des VEB Nema Netzschkau, der Klimatruhen vom VEB MAB Schkeuditz oder der Lüfterkonvektoren 5004 – 5006 des VEB Bergbau- und Hüttenkombinates „Albert Funk", Betrieb Kühlerbau Freiberg, ergeben sich bei Umstellung vom Heizmedium 90/70 °C auf die Vorlauftemperatur 45 °C etwa folgende Verhältnisse (Voraussetzung: Raumlufttemperatur, $\vartheta_{RE} = 20$ °C):

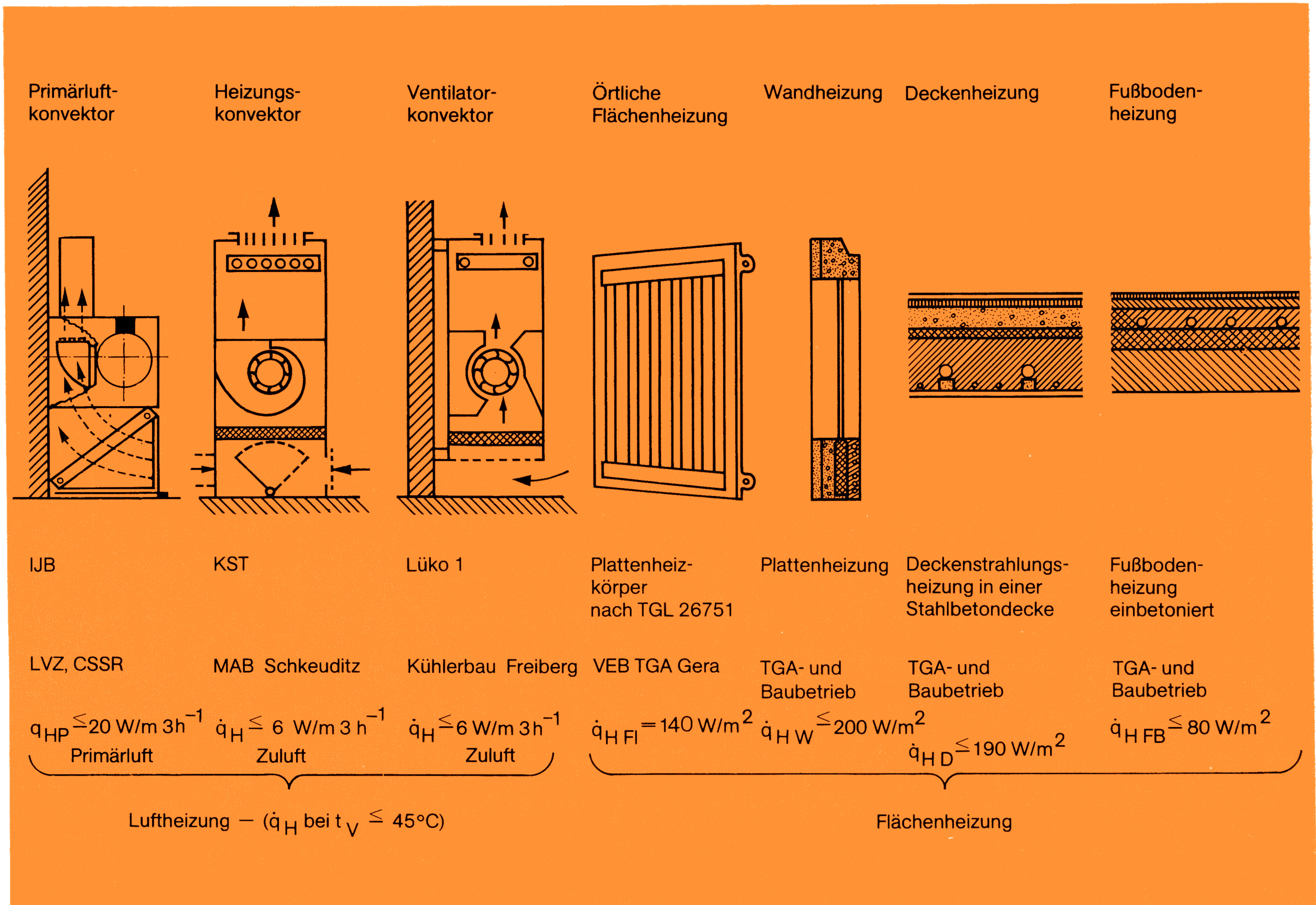


Bild 12 Niedertemperaturheizungen

Wand- und Deckenlufterhitzer (VEB Nema Netzschkau)

– Verwertbare Luftaustrittstemperatur aus dem Lufterhitzer $\vartheta_{LA} \geqq 26\,°C$ etwa für Lufteintrittstemperaturen $\vartheta_{LE} \geqq 15\,°C$. Diese Lufteintrittstemperatur entspricht der Mischlufttemperatur ϑ_M und wird bei einer Außentemperatur $\vartheta_A = -15\,°C$ und einem Außenluftanteil $n = 15\,\%$ erreicht, wie wie er bei den erforderlichen großen Förderströmen bei Niedertemperaturheizung fast immer ausreicht.
– Die Anzahl der Geräte und der Luftwechsel (bzw. der Luftförderstrom) müssen auf das 2,7fache erhöht werden.

Klimatruhen (VEB MAB Schkeuditz)

– Für Heizzwecke verwertbare Lufteintrittstemperatur ($\vartheta_{LE}=\vartheta_M$), abhängig von der Baugröße (KST063, 100, 160) und dem Förderstrom (jeweils 3 Stufen).
  Für die jeweils kleinste Drehzahl-Stufe (440, 680, 1030 m^2/h)und Verwendung des Standard-Heizers $\vartheta_{LE} \geqq 15\,°C$.
  Bei Verwendung des eingebauten Kühlers als Heizfläche liegt etwa $\vartheta_{LE} = 10\,°C$ für alle Drehzahlstufen.
– Die Wärmeübertragerfläche und der Luftvolumenstrom verdoppeln sich.
– Die Anzahl der erforderlichen Geräte verdoppelt sich bei Verwendung des Standardheizers, bleibt jedoch unverändert, wenn der eingebaute Kühler für die Heizung angewandt wird.

Lüfterkonvektoren (Freiberg)

– Für Heizzwecke verwertbare Lufteintrittstemperatur $\vartheta_{LE} = \vartheta_M \geqq 12\,°C$.
– Der Luftförderstrom verdreifacht sich, die Anzahl der Geräte (Einfachgeräte) muß verdoppelt werden.

Aus Bild 13 ist die Heizleistung der 3 untersuchten Gerätetypen bei Vorlauftemperatur 45 °C gegenüber denen mit der Vorlauftemperatur bei 90/70 °Czu ersehen.

Durch die ausgewiesene Erhöhung der Wärmeübertragerfläche (bzw. der Geräte-Anzahl) und des Luftförderstromes ergeben sich zunächst gegenüber den Typen mit 90/70 °C erhöhte Investitionskosten und Energiekosten für die Luftförderung. Die Gesamtwirtschaftlichkeit einer Luftheizung mit Niedertemperaturmedium muß deshalb durch die Einsparungen an Energiekosten für das Heizmedium nachgewiesen werden. Dieser Nachweis ist mit den hier angegebenen Vergleichswerten und den Heizenergiekosten bei Wärmepumpenschaltung für den konkreten Fall zu führen. Gelingt es jedoch, zugleich die Wärmelast auf Werte in der Größenordnung von 35 bis 45 W/m^2 zu bringen, ist es in vielen Fällen möglich, mit nur geringen zusätzlichen Heizflächen die Heizleistung zu übertragen.

Vorteile für die Niedertemperatur-Luftheizung anstelle der Niedertemperatur-Flächenheizung entstehen in folgenden Anwendungsfällen:

– für Gebäude mit geringem thermischen Beharrungsvermögen (zeitkonstant $T < 5$ h), weil die Zeitkonstante der Luftheizung ebenfalls gering ist (im Vergleich z. B. zur Fußbodenheizung mit $T \geqq 15$ h);
– für kurzzeitig bzw. nur zeitweilig genutzte Räume;
– Zusatzheizung für die Spitzenlast-Deckung in Kombination mit einem anderen NT-Heizsystem.

In allen Fällen, in denen ein Luftverteilungs-System für den Sommer (Lüftung oder Klimatisierung) vorhanden ist, sollte grundsätzlich die Luftheizung für den Winter als Vorzugsvariante angesehen werden, und zwar sowohl für die Grundheizung als auch für die Spitzenlast-Deckung u. U. in Kombination Hochtemperatur-Niedertemperatur-Heizmedium in Form der hybriden oder bivalenten Heizung.

Als Vorteil für zentrale Luftheizungsanlagen ist die Möglichkeit des Einsatzes von Einrichtungen zur Abluftwärme-Rückgewinnung anzusehen.

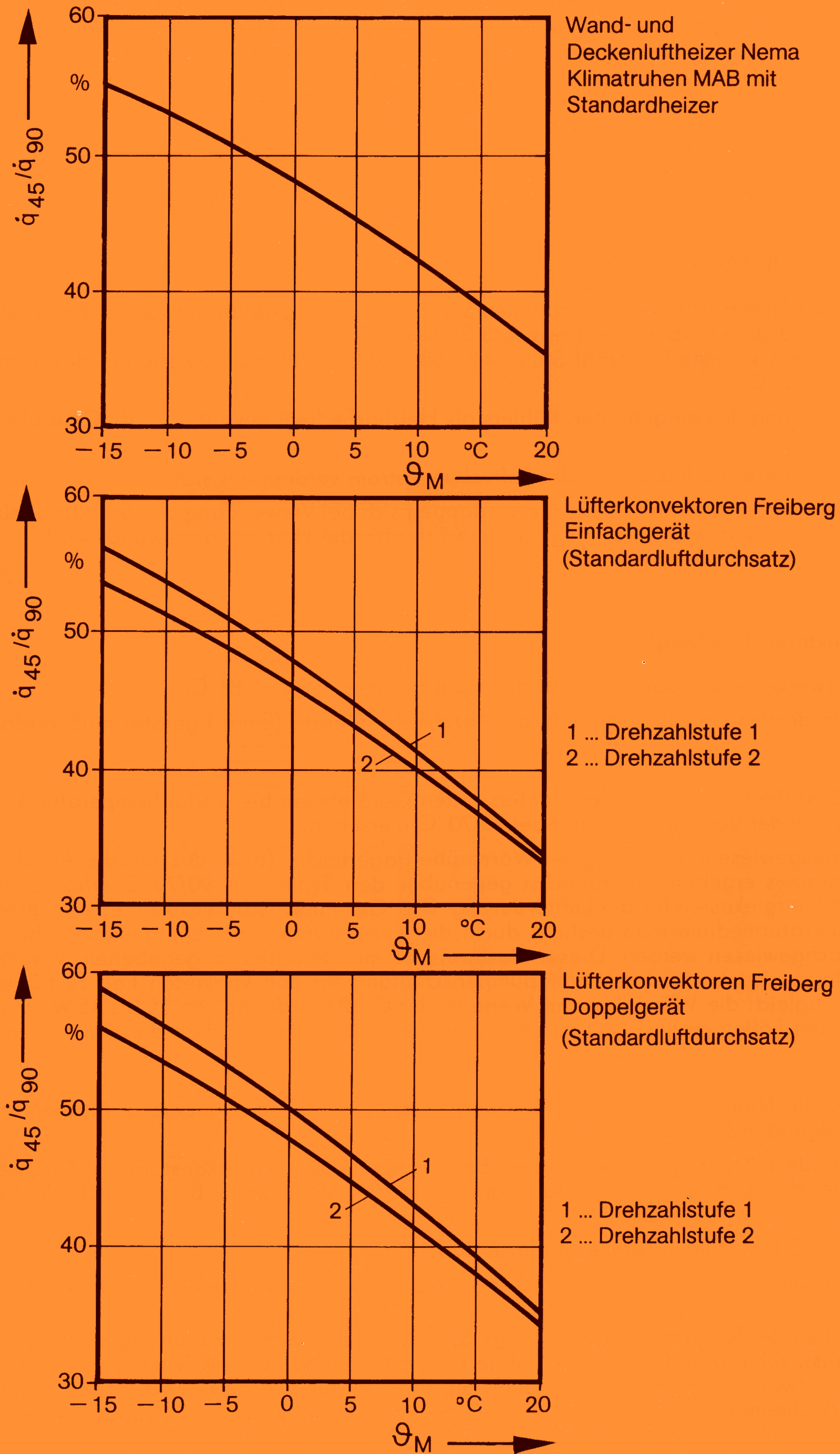


Bild 13 Heizleistung von Lüftungsgeräten bei 45 °C Vorlauftemperatur

2.2. Objekte mit Niedertemperatur-Brauchwarmwasser

Der überwiegende Teil des Brauchwarmwassers wird im Niedertemperaturbereich benötigt. Für Dusch- und Waschzwecke (Haushaltsbedarf) reichen Temperaturen von 40 bis 45 °C aus. Brauchwarmwasser wird im allgemeinen auch ganzjährig gefordert, so daß die Maschinen besser ausgelastet werden, wenn man diesen Bedarf mit Wärmepumpen abdeckt. Der Bedarf an Niedertemperatur-Brauchwarmwasser muß deshalb bei der Prozeßanalyse zur Vorbereitung des Wärmepumpeneinsatzes erfaßt und berücksichtigt werden.

2.3. Objekte mit Vorwärmung von höher temperiertem Brauchwarmwasser

Die Prozeßanalyse zur Vorbereitung des Wärmepumpeneinsatzes muß jedoch auch höher temperiertes Brauchwarmwasser erfassen. Durch Wärmepumpen mit Hilfe von Rohrbündelwärmeübertragern ist eine Vorwärmung von Brauchwarmwasser möglich. Dies ist insbesondere bei der Kälte-Wärme-Kopplung von Interesse. Die Vorwärmung des Brauchwarmwassers wird in diesem Fall als Nebenprodukt erzeugt und ist ohne zusätzlichen Energieaufwand möglich. Um die höheren Gebrauchstemperaturen zu erzeugen, wird nur der Energieaufwand für die Nachheizung erforderlich. Die Vorwärmung von Brauchwasser ist jedoch auch dann von Interesse, wenn für eine gegebene Leistungsgröße der Wärmepumpe eine höhere Nutzungsdauer in Vollaststunden erreicht werden kann.

Für die Rekonstruktion vorhandener Kälteanlagen mit dem Ziel der nachträglichen Wärmepumpenschaltung zur Nutzung der Kondensatorwärme bietet sich die Vorwärmung an, denn auf diese Weise läßt sich die jeweilig anfallende Abwärmeenergie nutzen, ohne daß die Kältemaschine verändert werden muß. Eine derartige Vorwärmung bringt z. B. in Schlachthöfen großen Nutzen. Mit Wärmepumpen kann u. a. auch die Zusatz-Speisewasservorwärmung für Heizkesselanlagen erfolgen.

2.4. Objekte mit technologischem Niedertemperaturwärmebedarf

In die Prozeßanalyse zur Vorbereitung des Wärmepumpeneinsatzes muß auch der Bedarf an Niedertemperaturwärme für technologische Zwecke einbezogen werden. Oft ist eine Heizung mit Niedertemperaturwärme erforderlich, um technologische Einrichtungen in einem konstanten Temperaturbereich zu halten.

Für den Transport von Schokoladenmasse in einem Rohrsystem in Doppelrohrauslegung an die einzelnen Arbeitsplätze wird z. B. Warmwasser von 30 ° C gebraucht. Dieses Temperaturniveau bietet günstige Bedingungen für die Anwendung von Wärmepumpen.

Für technologische Zwecke ist eine differenzierte Analyse erforderlich, die nicht nur von der Temperatur der derzeitigen Heizmedien, sondern vom Temperaturniveau des Nutzungsbereiches ausgeht.

3. Objekte mit wärmepumpengerechten Umweltbedingungen

3.1. Objekte an Oberflächengewässern

Zu den Oberflächengewässern gehören Flüsse oder Seen. Unterscheiden muß man zwischen thermisch unbelasteten und thermisch belasteten Gewässern. Da bei zu hohen Temperaturen der Sauerstoffgehalt in den Oberflächengewässern sinkt, liegt die Temperaturabsenkung mit Wärmepumpen im allgemeinen im Interesse der Wasserwirtschaft.

Bei Nutzung von Oberflächengewässern als Wärmequelle muß der Jahresgang der Wassertemperatur berücksichtigt werden. Die Temperaturen können bei Oberflächengewässern im Bereich von 20 K während des Ablaufes eines Jahres schwanken.

„Wenn das Wasser aus Flußstrecken entnommen werden kann, die durch Kühlwassereinleitungen stromauf künstlich aufgewärmt werden, lassen sich hohe Leistungszahlen der Wärmepumpenanlage erzielen.

Bei der Entnahme von Wasser aus Seen kann man auch bei tieferen Lufttemperaturen mit Wasser von wenigstens + 4 °C rechnen, wenn die Seen genügend tief sind. Bei großen Wassermassen kommt es zu merklichen zeitlichen Verschiebungen der Temperaturextremwerte im See, verglichen mit den Extremwerten der Lufttemperatur.

Eine Aufbereitung von Oberflächenwasser ist bei alleiniger Nutzung für Wärmepumpen nur in dem Maße notwendig, daß die Wärmetauscher nicht übermäßig zusetzen oder korrodieren. Flußwasser sollte an Stellen rascher Strömung entnommen werden, wo sich kein Schlamm ablagert. Durch feinmaschige Gitter und Rechen – zum Auswechseln oder Betriebsunterbrechung möglichst doppelt angeordnet – sind grobe Stoffe zurückzuhalten." ⟨8⟩

Bei Flußwasser mit hohem Anteil von Schwebeteilchen erfordern Rohrbündelwärmeübertrager oft einen zu hohen Wartungsaufwand. Deshalb haben sich auch Plattenverdampfer, die in Strömungsrichtung des Wassers vertikal stehende Platten aufweisen, bewährt. Dabei kann der Wasserstrom in den Behältern auch mehrmals umgelenkt werden. Plattenwärmeübertrager sind auch von Interesse, wenn in kalten Wintern das Oberflächenwasser bis nahe 0 °C abgekühlt wird.

Eine zweckmäßige Methode der Nutzung von Oberflächengewässern besteht darin, das Wasser durch Bohrungen oder Brunnen aus dem Uferfiltrat zu entnehmen. Aus dem Oberflächenwasser kann ein Wärmestrom bis zu 5,9 kW/m^3h^{-1} entnommen werden, bei extremen Außentemperaturen bis 4,5 kW/m^3h^{-1}.

3.2. Objekte an gut erschließbarem Grundwasser

Das Grundwasser bietet außerordentlich gute Voraussetzungen für die Anwendung von Wärmepumpen, da es während des ganzen Jahres mit fast gleichbleibenden Temperaturen von 8 . . . 10 °C zur Verfügung steht. Die Erschließung und Förderung des Grundwassers ist technologisch hoch entwickelt und bringt kaum Probleme. Auch die Wasserbeschaffenheit wird in der Mehrzahl der Fälle der Wärmepumpennutzung genügen, und Aufbereitungsmaßnahmen erübrigen sich. Das gekühlte Wasser sollte nur in den Fällen infiltriert werden, in denen das geförderte Grundwasser sich nicht nutzbringend weiterverwenden läßt, denn bei der Infiltration sind Betriebsprobleme zu erwarten. ⟨8⟩

Förder- und Sickerbrunnen sollten so weit wie möglich voneinander entfernt sein, mindestens 15 m. Die Sickerbrunnen müssen in Fließrichtung des Grundwassers hinter dem Förderbrunnen liegen.

Die Brunnentiefe zur Erschließung des Grundwassers ist bei der energetischen Analyse zu berücksichtigen, da mit zunehmender Brunnentiefe der Förderaufwand steigt. Aus dem Grundwasser läßt sich ein Wärmestrom von 4,5 bis 5,9 kW/m^3h^{-1} gewinnen.

3.3. Objekte mit Wasserentnahme aus dem öffentlichen Netz

Wasser als Wärmequelle für Wärmepumpen kann auch aus dem Netz eines öffentlichen Versorgungsträgers entnommen werden. Dafür gelten dann die Wasserversorgungs- und Abwassereinleitungsbedingungen ⟨9⟩, nach denen Wasserlieferungsverträge und Abwassereinleitungsverträge zwischen Versorgungsträger und Bedarfsträger abzuschließen sind ⟨8⟩. Eine derartige Nutzung ist nur dann in Betracht zu ziehen, wenn das öffentliche Netz ausreichend Reserven für die Nutzung als Wärmequelle hat.

3.4. Objekte mit geringer Bebauungsdichte für Erdreichwärmeübertrager

Erdreich hat in 1 bis 2 m Tiefe eine Temperatur, die sich im Verlauf eines Jahres nur wenig ändert. Sie kann genutzt werden, wenn in dieser Tiefe ein Wärmetauscher verlegt wird, der die Erde entwärmt.

An Objekten mit geringer Bebauungsdichte ist es möglich, das Erdreich als Wärmequelle für Wärmepumpen zu nutzen. Die Erdreichwärme stellt eine gespeicherte Sonnenwärme dar, die im Jahresrhythmus regenerativ und unabhängig von atmosphärischen Voraussetzungen ist. Die Leistungsgröße derartiger Erdreichwärmepumpen ist, bedingt durch den geringen Wärmestrom, im Bereich von 6 . . . 30 W/m^2 begrenzt und vorzugsweise für Einfamilienhäuser bekannt geworden.

Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches an das verlegte Rohr ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung, dem Feuchtigkeitsgehalt, der Dichte und der Temperatur und schwankt bei trockenem Erdreich zwischen 0,14 . . . 0,52 W/(m.K.) und bei feuchtem Erdreich zwischen 0,8 . . . 2,5 W/(m.K.). Bei horizontalen Rohrschlangen wird der Rohrabstand mit 0,6 . . . 1,2 m angegeben.

Mit zunehmender Tiefe der Rohrverlegung verschiebt sich das Minimum des nutzbaren Wärmestromes zu einem Zeitpunkt, bei dem die Außentemperatur bereits wieder ansteigt. Damit ist es möglich, bivalente Systeme mit der Wärmequelle Außenluft und Außentemperatur zu verwenden.

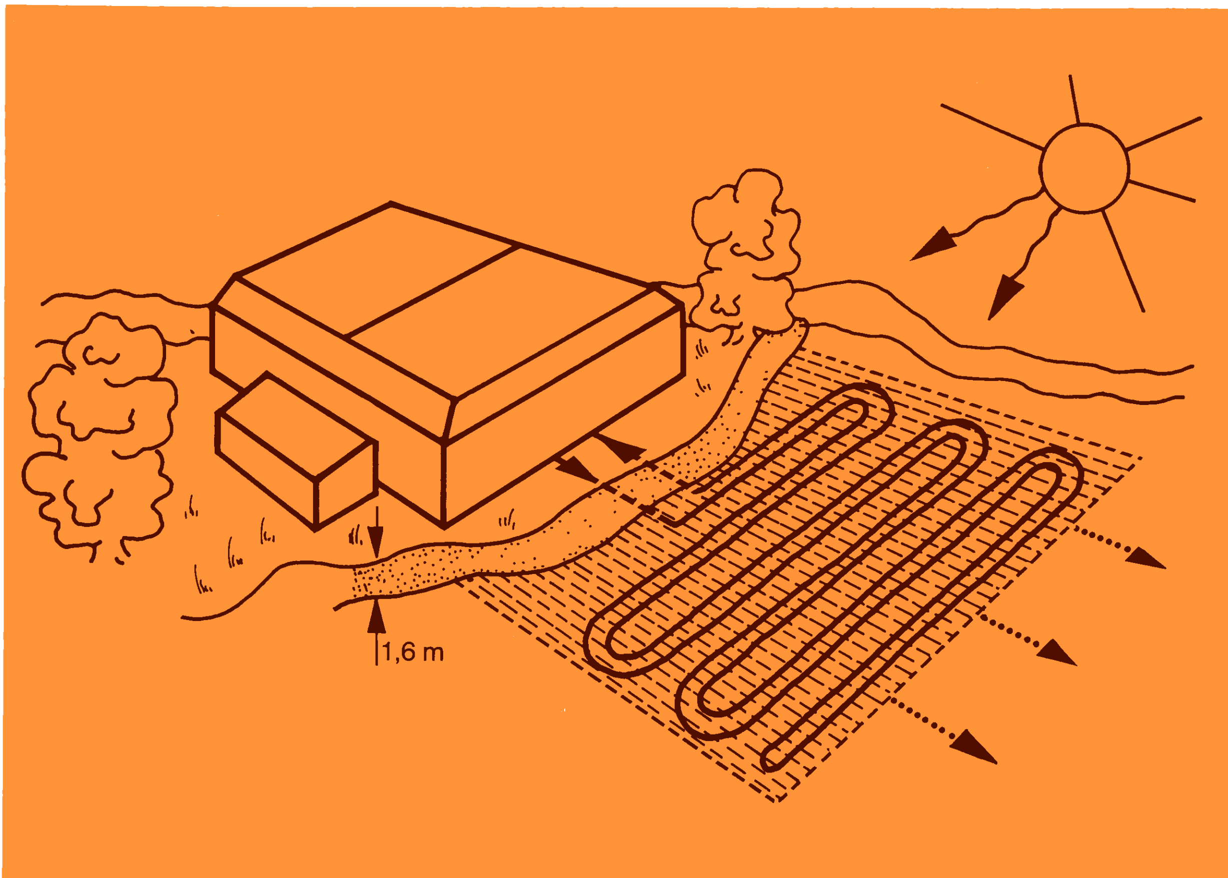


Bild 14 Prinzipbild eines Erdreichwärmeübertragers

Eine zusätzliche Wärmespeicherung im Erdreich kann dadurch erreicht werden, daß im Sommer der Erdreichwärmeübertrager zur Übertragung der Kondensationswärme an das Erdreich dient, so daß für den Winterbetrieb eine größere Speicherkapazität zur Verfügung steht.

Bild 14 zeigt das Prinzip eines Erdreich-Wärmeübertragers für eine Wasserwärmepumpe. Durch das Plastrohr (z. B. mit Polyäthylen) fließt eine frostfeste Flüssigkeit, Glykol oder Sole, die zum Verdampfer der Wärmepumpe geführt wird. Als Richtwert für die Bebauungsdichte gilt, daß die benötigte Erdreichfläche ca. das Doppelte der zu beheizenden Fläche betragen muß. Bei Gebäuden mit geringen Wärmelasten, z. B. bedingt durch niedrige Raumtemperaturen in Lagerräumen, ist auch ein günstigeres Flächenverhältnis möglich.

3.5. Objekte mit großflächigen Überdachungen

Objekte mit großflächigen Überdachungen oder vorgehängten Fassaden eignen sich zum Ausnutzen der Solarstrahlung. Unter großflächigen Überdachungen in diesem Sinne werden Gebäude verstanden, bei denen ein geringer Wärmebedarf je Quadratmeter überdachter oder bebauter Fläche auftritt. Objekte mit großflächigen Überdachungen und geringem Wärmebedarf kommen in Betracht:

– bei hoher innerer Wärmebelastung
– bei niedriger Raumlufttemperatur oder
– bei niedriger Raumluftemperatur mit lokal abgegrenzten Aufenthaltszonen.

Als Wärmequelle für Objekte mit großflächigen Überdachungen können Solarkollektoren eingesetzt werden, mit denen die Sonnenstrahlung direkt nutzbar ist.

Der nutzbare Wärmestrom von Sonnenkollektoren schwankt zwischen 30 und 480 W/m^2 Kollektorfläche. Die großen Unterschiede in der Kollektorleistung im Sommer und im Winter, aber auch in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad, erfordern spezielle Lösungen der wärmepumpengerechten Gestaltung.

Unter den Bedingungen der DDR sind Solarkollektoren, die vom VEB Leichtmetallbau Dessau geliefert werden, insbesondere für die Warmwasserbereitung im Sommer und in der Übergangsperiode einsetzbar.

Als besonders nützlich erweisen sich Wärmepumpen mit Solarkollektoren, wenn ein ganzjähriger Wärmebedarf, z. B. für Waschwasser, vorliegt und im Sommer – auch teilweise in der Übergangsperiode – auf die konventionelle Heizung verzichtet werden kann. Liegt der Wärmebedarf für diesen Zweck unter der Leistung der Sonnenkollektoren auf der verfügbaren Dachfläche, lohnt sich eine Untersuchung des Einsatzes.

Der Einsatz von Solarkollektoren erfordert hohen Investitionsaufwand, der sich jedoch verringern läßt, wenn der Solarkollektor in die Dachfläche integriert werden kann. Die Integration läßt sich mit den neuen Solarkollektoren gut verwirklichen. Noch bessere und für die Dachgestaltung ökonomischere Bedingungen werden mit Solarabsorbern erreicht. Solarabsorber bestehen im wesentlichen nur noch aus dem Plattenwärmeübertrager. Durch die Kopplung der Solarabsorber mit dem Verdampfer der Wärmepumpe ist es möglich, die konvektiven Wärmeverluste des Solarabsorbers zu reduzieren, indem eine niedrige Kollektortemperatur gewählt wird. Gleichzeitig ist es mit Hilfe der Wärmepumpe möglich, die gewonnene Energie auf ein nutzbares Temperaturniveau zu erhöhen. Nachts und bei stark bedecktem Himmel können diese Solarabsorber mit Hilfe der Wärmepumpe auch mit Wassertemperaturen unter der Umgebungstemperatur gefahren werden. So wird der Solarabsorber zum Wärmeübertrager, das Solardach zum Energiedach.

Auf diese Art, die Dachkonstruktion zur Warmwasserversorgung im Sommer und in der Übergangsperiode zu nutzen und damit die festen Brennstoffe für die Winterperiode zu speichern, muß ernsthaft in die Überlegungen zur Investitions- und Energiepolitik einbezogen werden.

Wärmepumpen mit Solarkollektoren oder Solarabsorbern mit den erforderlichen Speichern und bivalenten Quellen oder Heizsystemen setzen eine besondere Planung voraus. Alle Quellen und Senken der Objekte müssen in die Untersuchung einbezogen werden.

Nur auf der Grundlage einer komplexen Gestaltung gelingt es, ökonomische Lösungen zu realisieren, die nicht nur langfristig bedeutende Energieeinsparungen bringen, sondern auch in angemessenen Zeiten eine Amortisation gewährleisten.

3.6. Objekte mit Nutzung von Außenluft als Wärmequelle

Außenluft steht in allen Fällen unbegrenzt als Wärmequelle zur Verfügung.

Bedingt durch die geringe Dichte, hat die Luft nur eine geringe Wärmekapazität, so daß große Luftmengen und große Wärmeübertrager erforderlich sind. Der mögliche Wärmeentzug aus der Außenluft liegt im Bereich von 1,4 . . . 2,2 $Wm^{-3}h$. Gleichzeitig bedingt durch die geringe Dichte, ist jedoch auch der Förderaufwand gering.

Bei der Ausnutzung der Außenluft als Wärmequelle sind nicht nur die tageszeitlichen, sondern insbesondere die jahreszeitlichen Schwankungen zu beachten. Da die tiefste Wärmequellentemperatur und die größte erforderliche Heizleistung zeitlich zusammenfallen, steigt der Elektroenergieverbrauch durch die sinkende Leistungszahl bei immer kälter werdenden Winterbedingungen an.

Wird die maximale Leistung der Wärmepumpe so ausgelegt, daß der Verdampfer bei Erreichen der Taupunktlinie vereist, so ist eine Abtauvorrichtung erforderlich.

Die Besonderheit der Außenluft als Wärmequelle für Wärmepumpen besteht darin, daß bei deren Ausnutzung keine Auswirkungen auf das ökologische Gleichgewicht auftreten, denn die der Luft entzogene Wärme wird über die Wärmeabgabe der Gebäude der Außenluft wieder zugeführt. An Standorten, die keine Entnahme von Brunnen- oder Oberflächenwasser wirtschaftlich zulassen, muß erwogen werden, die Luft als Wärmequelle zu nutzen. Für den Winterbetrieb sind zusätzliche Wärmequellen in Betracht zu ziehen oder in Bivalenz Brennstoffheizungen vorzusehen.

3.7. Objekte an geothermischen Energieträgern

Geothermische Energie ist Erdwärme, die vor allem durch den Verfall von radioaktivem Material im Erdinneren entsteht und als Wärmestrom an die Erdoberfläche transportiert wird. Dieser Wärmestrom ist die Ursache für die geothermische Tiefenstufe, d. h. die Tiefenspanne, die beim Eindringen in die Erde einer Zunahme der Temperatur um je 1 K entspricht; sie beträgt im Durchschnitt 30 . . . 35 m. An bestimmten Stellen der Erde, in Vulkangebieten und in jungen Geosynklinalen, können jedoch, abweichend von der geothermischen Tiefenstufe, schon in Tiefen von 1 . . . 2 km nutzbare Temperaturen von 250 °C vorhanden sein.

Geothermischer Energieträger ist das Tiefen- oder Thermalwasser, das im allgemeinen bei niedrigen Temperaturen anfällt und über Wärmepumpen genutzt werden kann.

An alten, nichtgenutzten Bergwerkstollen ist es möglich, die geothermische Tiefenstufe auszunutzen. Bezieht man das vorhandene Stollensystem ein, können die Erschließungskosten reduziert werden. Wärmeträger zur Nutzung der geothermischen Wärme sind die Luft oder das Wasser. Dabei ist es möglich, die Bergwerkstollen nicht nur als direkte Wärmequelle, sondern auch in Form natürlicher Speicher wechselweise als Wärmesenke und als Wärmequelle einzusetzen. Berücksichtigt werden muß jedoch der teilweise erhebliche energetische Aufwand für den Transport der Energieträger.

4. Objekte mit wärmepumpengerechten technologischen Bedingungen

4.1. Objekte mit abkühlbarem Wasserbedarf

Wasser ist ein wichtiger Prozeßstoff in vielen Technologien der Industrie, in der Landwirtschaft und in Gesellschaftsbauten. Der Wärmeträger Wasser erfüllt im allgemeinen am besten die Bedingungen, ganzjährig mit relativer Temperaturkonstanz ein Wärmeangebot bereitzustellen. Bei der Analyse des Einsatzes von Wärmepumpen muß deshalb der schon geplante technologische Wasserbedarf berücksichtigt werden. Dabei ist es unerläßlich, den Wasserbedarf differenziert nach den verschiedenen technologischen Verwendungszwecken zu erfassen.

Die Analyse des Wasserbedarfs, differenziert nach den technologischen Bedarfsträgern, muß sichern, daß nicht nur die Wassermenge, sondern auch die zweckmäßigsten Bedingungen, insbesondere Temperaturbedingungen, erfaßt werden.

Ein bedeutender Anteil des technologischen Wasserbedarfs wird für Kühlaufgaben eingesetzt. Gerade bei diesem Verwendungszweck kommt es darauf an, Wasser mit extrem niedriger Temperatur, möglichst in der Nähe des Gefrierpunktes, bereitzuhalten.

Auf der Grundlage der Analyse des Wasserbedarfs ist der abkühlbare Wasserbedarf unter Berücksichtigung der Nutzungsbedingungen zu erfassen.

Bei Übereinstimmung des zeitlichen Bedarfs von abkühlbarem Wasser und Niedertemperaturwärme ist es zweckmäßig, dem Wasser über den Verdampfer einer W-W- oder W-L-Wärmepumpe Wärme zu entziehen, bevor es für technologische Zwecke zum Einsatz kommt (Bild 15). Dadurch kann der technologische Wasserbedarf für Kühlaufgaben je nach Wasseraustrittstemperatur nach dem Kühler um 5 . . . 40 % gesenkt werden, oder bei gleichem Förderstrom die Fläche des Kühlers und damit der Investitionsaufwand für die technologische Einrichtung verkleinert werden.

Der besondere Vorteil der Reihenschaltung einer Wärmepumpe vor dem technologischen Bedarfsträger von abkühlbarem Wasser besteht jedoch darin, daß keine zusätzlichen Aufwendungen für die Wassererschließung und den Wassertransport erforderlich sind. Bei den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen der Wärmepumpe muß lediglich der Energieaufwand für den zusätzlichen Druckverlust beim Durchströmen des Wassers im Verdampfer in Rechnung gestellt werden. Da sich bei Kühlaufgaben durch die vorherige Abkühlung der Wasserbedarf oder die Kühlergröße reduziert, wirken diese Faktoren noch positiv auf die Amortisationsbedingungen der Wärmepumpe.

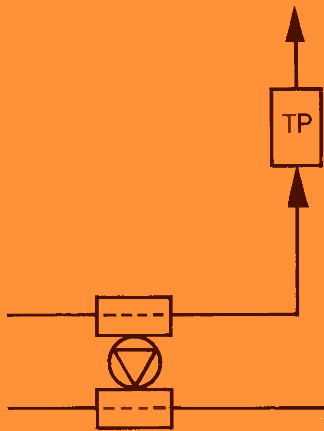
Eine Abkühlung mit Hilfe einer Wärmepumpe vor dem Verbrauch kann auch bei Trinkwasser zweckmäßig sein. Die Qualität des Trinkwassers wird bei langen und verzweigten Leitungsnetzen insbesondere dann beeinträchtigt, wenn das Wasserrohrnetz hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt ist. Deshalb kann auch eine Abkühlung des Trinkwassers mit Hilfe einer Wärmepumpe zur Qualitätsverbesserung führen. Ist das Trinkwasser für Kochprozesse vorgesehen, bringt die Abkühlung mit Wärmepumpen keinen energetischen Gewinn.

Wichtig ist in allen diesen Fällen jedoch immer, daß der zeitliche Bedarf von abkühlbarem Wasser und Niedertemperaturwärme übereinstimmt oder durch Speicher in Übereinstimmung gebracht wird. Ist dies der Fall, dann liegen wärmepumpengerechte Bedingungen vor.

Wärmepumpen in Objekten mit abkühlbarem technologischen Wasserbedarf sichern im allgemeinen gute Amortisationsbedingungen.

Abkühlbarer Wasserbedarf

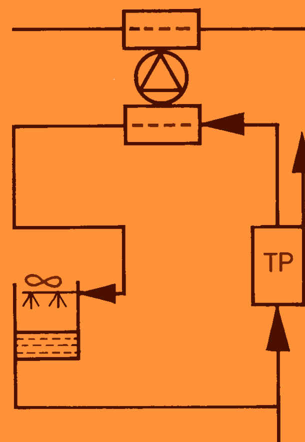
Reihenschaltung



TP mit hohem Wasserverbrauch und Wasserverschmutzung

Abkühlbares Kreislaufwasser

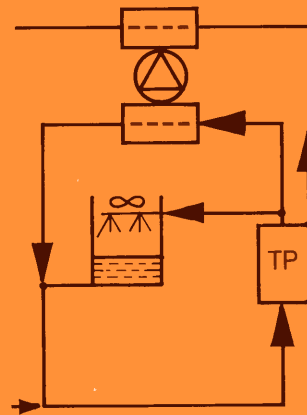
Reihenschaltung



Heizbedarf ganzjährig

Abkühlbares Kreislaufwasser

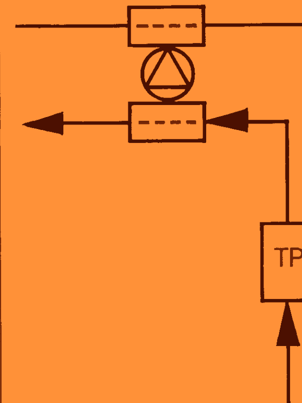
Parallelschaltung



Heizbedarf alternativ Sommer-Winter

Gleichmäßiger Abwasseranfall

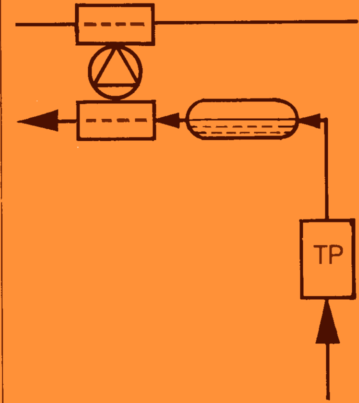
Reihenschaltung



TP mit Wasser-verschmutzung

Ungleichmäßiger Abwasseranfall

Reihenschaltung mit Speicher



TP mit geringer Wasserverschmutzung

Bild 15 Schaltungen von Wärmepumpen in technologischen Prozessen mit Wasserbedarf

4.2. Objekte mit abkühlbarem Kreislaufwasser

Zur Reduzierung des Wasserbedarfs und für die Führung technologischer Prozesse wird der Prozeßstoff Wasser häufig als Kreislaufwasser eingesetzt. Kreislaufwasser dient in den meisten Fällen dazu, aus technologischen Einrichtungen Wärme abzuführen. Ein geschlossener oder halboffener Wasserkreislauf wird dann gewählt, wenn die technologischen Einrichtungen einen hohen Reinheitsgrad des Wassers erfordern, wenn zu wenig Wasser zur Verfügung steht, oder wenn das Wasser als Wärmeträger zwischen einer Wärmequelle oder Wärmesenke innerhalb eines technologischen Prozesses dient.

Bei der Analyse wärmepumpengerechter Bedingungen ist auch das Kreislaufwasser als Wärmequelle für die Wärmepumpe einzubeziehen. Von Interesse ist die zweckmäßigste Stelle im Wasserkreislauf, an der das Wasser so abkühlbar ist, daß der technologische Prozeß verbessert oder zumindest nicht verschlechtert wird (Bild 13). Dient das Kreislaufwasser Kühlzwecken, ist immer mit einer Verbeserung des technologischen Prozesses zu rechnen. In diesem Fall ist es bei Übereinstimmung von Wärmebedarf über die Wärmepumpe und das Wärmeangebot des Kreislaufwassers möglich, entweder den Förderstrom des Wassers zu reduzieren oder den Wärmeübertrager in der technologischen Einrichtung zu verkleinern. Zu diesen die Anwendung der Wärmepumpe fördernden Effekten kommen noch zwei Vorteile: Für die Erschließung des Wassers sind keine zusätzlichen Investitionen und für die Förderung keine zusätzliche Energie erforderlich. Lediglich der Druckverlust beim Durchströmen des Verdampfers beeinflußt die Leistungszahl ε.

Für den Wärmepumpeneinsatz ist insbesondere abkühlbares Kreislaufwasser mit Temperaturdifferenzen bis zu 30 °C von Interesse. Bei Einsatz von Wärmepumpen mit speziellen Kältemitteln sind jedoch auch höhere Quelltemperaturen des Kreislaufwassers möglich.

Abkühlbares Kreislaufwasser wird bei vielen technologischen Prozessen gebraucht, z. B. für

– Kühlturmbetrieb bei Kälteanlagen
– Kühlbetrieb in der Nahrungsmittel- und Genußmittelproduktion
– Kondensatorwasser in Kraftwerken
– Rücklaufwasser von Fernheizwerken.

Nutzbringend ist auch der Einsatz von Kreislaufwasser in Kombination mit dem Kühlturmbetrieb. Derartige Kleinkühltürme werden z. B. auch für die Abführung der Kondensationswärme bei Kältemaschinen eingesetzt. Oft wurden derartige Anlagen schon vor Jahren installiert und können deshalb im Sommer mit Kühlturmbetrieb und im Winter als Quelle für eine zusätzliche Heizungswärmepumpe eingesetzt werden, wobei natürlich die Korrosionsbedingungen zu beachten sind. Bild 13 zeigt derartige Schaltungen. Die Kombination des Kreislaufwassers mit einer zusätzlichen Wärmepumpe erweist sich beim Kältemaschinenbetrieb natürlich nur dann als sinnvoll, wenn eine direkte Kälte-Wärme-Kopplung nicht möglich ist. Das kann insbesondere dann der Fall sein, wenn vorhandene Kälteanlagen abwärmeseitig über Wärmepumpen genutzt werden sollten.

Auch Wärmepumpen mit abkühlbarem Kreislaufwasser als Wärmequelle ermöglichen in vielen Fällen eine wärmepumpengerechte Gestaltung.

4.3. Objekte mit gleichmäßigem Anfall von Niedertemperaturabwässern

In die Prozeßanalyse zur Wärmepumpenanwendung ist auch das Niedertemperatur-Abwasser einzubeziehen.

Bereits der Wärmepumpenbetrieb mit abkühlbarem Kreislaufwasser sichert die Ausnutzung von Abwärme aus technologischen Prozessen, jedoch mit der Nebenbedingung, daß diese Abwärme dem Kreislaufwasser an der richtigen Stelle entzogen wird. Bei einem gleichmäßigen Anfall von Abwasser aus technologischen Prozessen treten noch weniger Restriktionen hinsichtlich der Wärmebilanz für den Wärmepumpenbetrieb auf. Die mit dem Abwasser geführte Abwärme läßt sich in den meisten Fällen recht gut über Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau bringen (Bild 13). Als Quelle für Wärmepumpen sind insbesondere Abwasser mit einer Temperatur unterhalb 30 °C von Interesse.

Die Ausnutzung von Abwasser durch den Wärmepumpenbetrieb setzt jedoch eine Analyse der Schmutz- und Schadstoffe des Abwassers voraus, um eine einwandfreie Funktion und Zuverlässigkeit der Arbeit des Verdampfers zu gewährleisten.

In großem Umfang fällt industrielles Brauchwasser als Abwasser an. Jedes saubere bis leichtverschmutzte Wasser ohne aggressive Eigenschaften kann über die Wärmepumpe ausgenutzt werden. Natürlich sind dabei Temperaturbedingungen zu beachten, von denen auch die Auswahl der Kältemaschinen und Kältemittel abhängt.

Auch kommunale Abwasser – gleichmäßig fallen sie z. B. in Badeanstalten an – haben ganzjährig eine genügend hohe Temperatur.

In vielen Fällen steht das Abwasser nicht gleichmäßig zur Verfügung. In sozialen Einrichtungen von Industriebetrieben liegen die Spitzen des Wasserverbrauches beim Schichtwechsel. Um einen gleichmäßigen Anfall von Abwasser bzw. eine Übereinstimmung des Wärmeangebotes und des Wärmebedarfs zu sichern, werden Speicher für das Abwasser eingesetzt. Solche Speicher sind auch, um die Wärmebelastung des Kanalisationsnetzes zu verringern, oft zur Abkühlung des Abwassers erforderlich. Im Bild 16 ist ein derartiger Speicher, gekoppelt mit einer Wärmepumpe, dargestellt.

Der Wasserverbrauch eines Haushalts von 50 . . . 100 l/Familie und Tag führt zu einem Abwasser mit einer Temperatur zwischen 24 und 30 °C. Bei dem ungleichmäßigen Anfall im Einzelhaushalt ist jedoch eine Abwassernutzung nur sinnvoll, wenn eine Wärmepumpe vorhanden ist und durch entsprechende Schaltungen die Abwasserwärmequelle genutzt wird. Anders sind die Verhältnisse jedoch in großen Wohnkomplexen, in denen das Abwasser bereits gleichmäßiger anfällt und durch spezielle Wärmepumpen mit hoher Leistungsziffer genutzt werden kann.

Ein typisches Beispiel für den Abwasseranfall sind industrielle oder kommunale Waschmaschinen und auch große Geschirrspülmaschinen. Diese haben einen spezifischen Energieverbrauch von 60 . . . 75 kJ/Teller. Wärmepumpen können ihn auf mindestens 50 % verringern.

Abwasser fällt gleichmäßig und vielfältig an und ist als Anfallenergie insbesondere bei Wasch- und Kühlprozessen für die Ausnutzung mittels Wärmepumpen von Interesse. Dabei muß berücksichtigt werden, daß der Entzug der Wärme und ihre wiederholte Nutzung gleichzeitig die Umwelt entlastet.

Bei der Ausnutzung des Abwassers entfallen ebenfalls Investitionen für die Wassererschließung und Energiekosten für die Förderung des Wassers. Teilweise sind jedoch zusätzliche Aufwendungen zum Reinigen des Wassers vor Eintritt in den Verdampfer erforderlich.

Unbedingt sollte auch einer der wichtigsten Faktoren der wärmepumpengerechten Gestaltung von Prozessen berücksichtigt werden: Das gleichmäßig anfallende Abwasser bzw. dessen Speicherung zum gleichmäßigen Verbrauch.

Bild 16 zeigt den Abwasserspeicher mit Plattenverdampfer einer Abwasser-Brauchwarmwasser-Wärmepumpe (Objekt Bertold-Brecht-Allee Dresden).

4.4. Objekte mit gleichmäßigem Anfall von Abluft

Abwärme aus technologischen Prozessen wird nicht nur über den Prozeßstoff Wasser, sondern in bedeutendem Umfang auch über die Luft abgeführt. Dabei muß man zwischen der indirekten und direkten Abführung von Abwärme über die Luft unterscheiden.

Die indirekte Abführung von Abwärme mit Hilfe von Luft erfolgt über die Raumluft. Im Bild 17 ist schematisch die Wärmebelastung nach Petzold ⟨10⟩ dargestellt und die indirekte Abführung der Abwärme ersichtlich.

Neben der äußeren, vom Gebäude abhängigen Belastung erfolgt die innere, von der Raumnutzung abhängige Belastung. Sie kann zwischen 60 . . . 150 W/Person und 45 . . . 95 W/m^2 Raumfläche für die Beleuchtungsanlage betragen. Liegt die Maschinenwärmebelastung in vertretbaren Grenzen, wird sie ebenfalls indirekt über die Raumluft als Fortluft abgeführt.

Eine direkte Abführung der Maschinenabwärme mit Hilfe von Luft erfolgt bei großer Maschinenwärmebelastung und bei kombinierter Wärme- und Schadstoffabführung. Dabei werden entweder die Maschinen gekapselt und direkt durchströmt oder die Wärmelasten über den Maschinen örtlich im Raum abgesaugt (Bild 17). In zunehmendem Maß ist man bemüht, die Wärmelast, die über die Raumluft abzuführen ist, zu reduzieren, so daß z. B. auch mit Hilfe von Absaugleuchten die Abwärme direkt abgeführt und die Wärmelast durch hinterlüftete Scheiben direkt reduziert werden kann.

Wärmepumpen in der Ausführung L-W und L-L, d. h. mit Abluft als Wärmequelle, werden sowohl für die direkte als auch für die indirekte Abführung der Abwärme über den Energieträger Luft eingesetzt. Bei der Ausführung Luft-Luft ist in jedem Fall ein Wirtschaftlichkeitsvergleich mit dem Regenerator bzw. dem rekuperativen Zirkulationssystem notwendig. Insbesondere mit dem Regenerator lassen sich gleiche Energieübertragungsgrade verwirklichen wie mit der Wärmepumpe, wobei die Investitionsaufwendungen wesentlich geringer sind. Deshalb wird in vielen Fällen der Wärmerückgewinnung mit dem Regenerator der Vorzug gegeben.

Gerade für die Wärmerückgewinnung aus der Abluft mit Hilfe von Wärmepumpen gilt das Prinzip, diese nur dort einzusetzen, wo eine wärmepumpengerechte Gestaltung möglich ist.

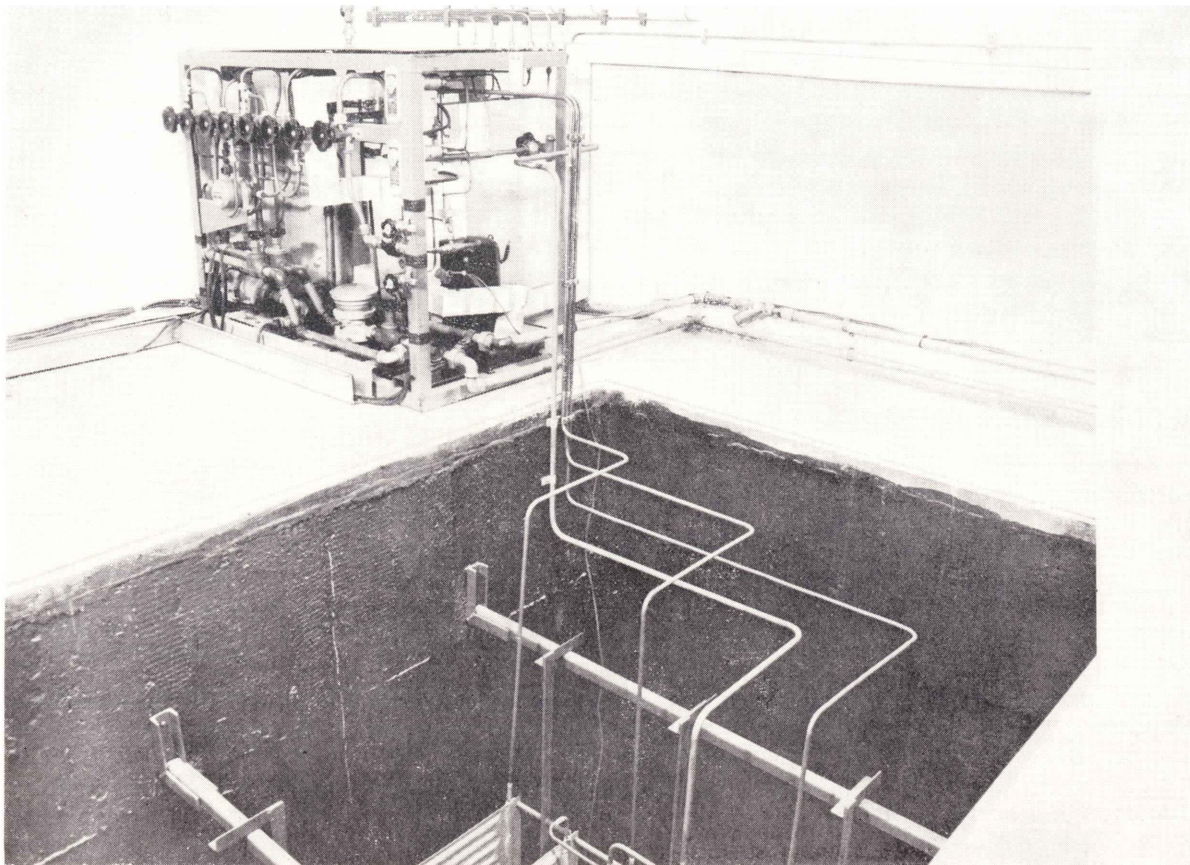
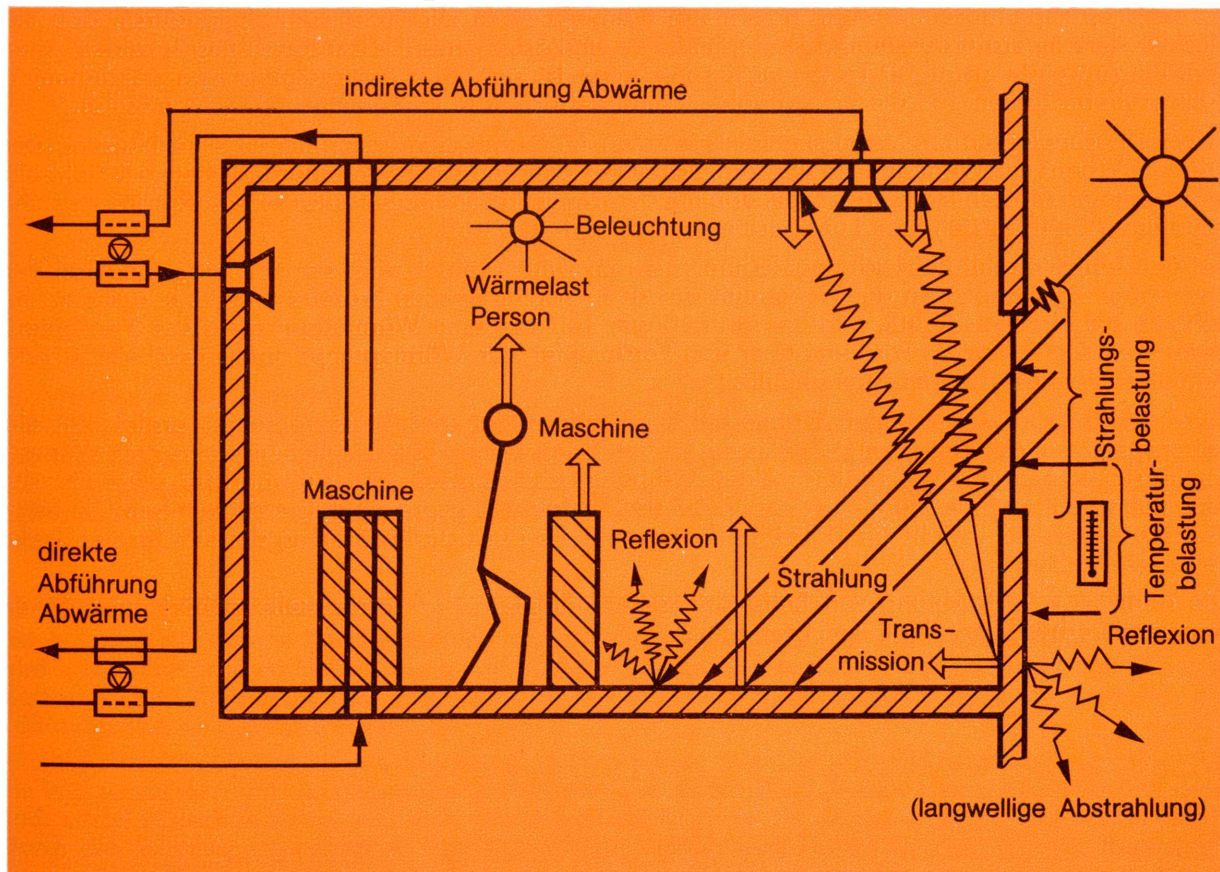


Bild 16 Abwasserspeicher mit Plattenverdampfern einer Abwasser-Brauchwasser-Wärmepumpe

Bild 17 Direkte und indirekte Abführung der Abwärme durch Abluft



Wird z. B. ganzjährig eine Maschinenwärme mit Hilfe von Luft direkt abgeführt und ist zu gleicher Zeit ein Wärmebedarfsträger für Warmwasser vorhanden, dann lohnt sich der Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, wenn die Temperaturdifferenzen eine hohe Leistungszahl ε ermöglichen. Oft läßt sich auch im Sommer der Luftförderstrom verringern, wenn der Verdampfer der Wärmepumpe wahlweise vor das Maschinenaggregat geschaltet wird.

Die Wärmepumpe wird dann interessant, wenn bei einer Ausführung Luft-Luft eine Wärme-Kälte-Kopplung möglich ist. Notwendig ist die Abluft-Wärmepumpe, wenn auf der Seite der Wärmesenke höhere Temperaturen erforderlich sind oder wenn wegen Verunreinigungen der Abluft der Regenerator nicht eingesetzt werden kann.

Wärmepumpen können auch zur weiteren Unterkühlung der Abluft, dem Regenerator nachgeschaltet, eingesetzt werden.

4.5. Objekte mit Entfeuchtungstechnologien

Die nutzbare Abwärme aus der Abluft kann aus dem sensiblen Δh_s- und dem latenten Δh_L-Anteil unter Berücksichtigung des Feuchtigkeitsgehaltes bestehen. Bei Objekten mit Entfeuchtungstechnologien wird der Abluft Feuchtigkeit über den Verdampfer der Wärmepumpe entzogen. Die aufgenommene spezifische Wärme im Verdampfer Δh_K beträgt je kg Luft

$$\Delta h_K = \Delta h_s + \Delta h_L.$$

Eine Entfeuchtung der Abluft kann Nebenerscheinung oder Hauptzweck beim Einsatz einer Wärmepumpe sein.

Die am meisten verbreitete Entfeuchtungstechnologie mit Wärmepumpe ist die Schwimmbadentfeuchtung. Die Bedeutung der Schwimmbadentfeuchtung läßt sich z. B. daran erkennen, daß bei einer Beckenfläche eines Hallenbades von 25 m $\times$ 12,5 m und 300 Betriebstagen mit je 300 Badegästen bis zu 350 t Wasserdampf aus Becken und Duschen mit einer rückgewinnbaren Wärmemenge bis zu 244 MWh/a frei werden. Gleichzeitig ist in einem Hallenbad immer ein Bedarf an Niedertemperaturwärme für das Frischwasser und die Duschen sowie für die Außenluft vorhanden.

Entfeuchtungstechnologien werden jedoch auch im industriellen Bereich angewandt und lassen sich mit Wärmepumpen lösen. Bewährt haben sich Wärmepumpen zur Holztrocknung dadurch, daß sie eine Niedertemperaturtrocknung als gleichmäßige und schonende Holzentfeuchtung bewirken können. Ein Anwendungsfall für Trocknungstechnologien ist auch die Austrocknung von geschäumten Polystyrolformstücken. Bei dieser Technologie sind beträchtliche Energieeinsparungen möglich.

In Waschtechnologien mit Lösungsmitteln gestatten Entfeuchtungswärmepumpen eine Nutzung der latenten Wärme als Wärmequelle und zugleich eine stoffliche Rückgewinnung der Lösungsmittel, und nicht zu unterschätzen ist die Tatsache, daß mit derartigen Technologien auch eine durch lösungsmittelhaltige Abluft entstehende Luftverschmutzung vermieden wird.

Bei den Objekten mit Entfeuchtungstechnologien im Umluftbetrieb wird der überwiegende Teil der Nutzwärme zum Aufheizen der Trockenluft aus dem technologischen Prozeß selbst, d. h. aus der Abkühlung der feuchten Abluft, und nur ein geringer Teil aus dem Wärmeäquivalent des Verdichters gewonnen. Der Luftstrom wird erst über den Verdampfer der Wärmepumpe und anschließend zum Aufheizen über den Kondensator geführt.

Durch die Nutzung der latenten Wärme bei der Kondensation des Wasserdampfes ergibt sich ein hoher spezifischer Wärmestrom; Objekte mit Entfeuchtungstechnologien stellen also eine gute Wärmequelle dar und realisieren zugleich einen technologischen Prozeß. Der Aufwand für die Entfeuchtung kann somit auf die Wärmequelle und auf den Entfeuchtungsprozeß aufgeteilt werden. Die Kondensatorwärme ist sowohl für beliebige Heizzwecke als auch zur Erwärmung der Luft für den Trokkenprozeß nutzbar.

Die analytische Betrachtung von Entfeuchtungstechnologien als Wärmequelle gehört zur wärmepumpengerechten Gestaltung von Prozessen.

5. Objekte mit Kälte-Wärme-Kopplung

Wärmepumpen sind Kältemaschinen, die sich durch die Art ihrer Nutzung auszeichnen. In jeder Kältezentrale muß die Kondensationswärme über den Wärmeträger Luft bei luftgekühlter Ausführung oder über den Wärmeträger Wasser bei wassergekühlter Ausführung an die Umgebung abgeführt werden. Ist eine direkte Kühlung mit Oberflächen- oder Brunnenwasser nicht möglich, wird die Wärme über einen Wasserkreislauf und Kühlturmbetrieb an die Umgebungsluft abgeführt.

Durch die Nutzung der Abwärme von Kältemaschinen wird diese zugleich zum Wärmepumpensatz. Unter Kälte-Wärme-Kopplung wird die gleichzeitige oder wechselseitige Nutzung eines Kaltdampfmaschinenprozesses zum Kühlen und Heizen verstanden. Tafel 5 zeigt Beispiele für die Kälte-Wärme-Kopplung für verschiedene Anwendungsgebiete. Wärmepumpenanlagen können je nach Zielstellung des zu planenden Objektes nach verschiedenen Prioritäten eingesetzt werden.

Tafel 5: Beispiele der Kälte-Wärme-Kopplung nach ⟨11⟩

Art der Anlage	Wärmebedarf für	Kältebedarf für
Fischverabeitung	Warmwasser zum Säubern	Eiserzeugung
Fleischfabriken	Warmwasser für Reinigung	Kühlung von Eiserzeugung
Landwirtschaftliche	Warmwasser für	Kühlung von Milch;
Betriebe	Waschmaschinen und	Raumkühlung
Molkereien	Reinigung	Kühlung von Milch und
Schlachthöfe	Warmwasser für Reinigung	Lagerraumkühlung
Eisbahnen	Warmwasser für Reinigung	Kühl- und Gefrierräume
Kühlhäuser	Raum- und evtl. Hallenheizung	Eisbahnen
Brauereien	Raumheizung, evtl. Wärmeverkauf	Kühlräume Bierkeller- und Würze-
Industrielle	Warmwasser	kühlung
Energiezentralen	Warm- und Heißwasser	Kühlsole, Eis, Eiswasser

a) Vorrangige Kältenutzung

Die Kälte-Wärme-Kopplung unter dem Gesichtspunkt der vorrangigen Kältenutzung stellt eine intensive Wärmepumpenanwendung dar, da für den Kreisprozeß der Maschine keine wesentlichen Investitionen erforderlich sind. Deshalb sollte bei ausgeführten und in Planung befindlichen Objekten mit Kältesätzen prinzipiell geprüft werden, inwieweit sich die Abwärme nutzen und damit die Wärmepumpe anwenden läßt.

b) Vorrangige Wärmenutzung

Bei Anlagen mit Wärme-Kälte-Kopplung unter dem Gesichtspunkt der vorrangigen Wärmenutzung wird das Nebenprodukt Kälteleistung mit relativ wenig Kosten erzeugt. Aber auch hier werden die Nutzungs- und Amortisationsbedingungen für die Wärmepumpe verbessert, wenn sie zusätzlich für Kühlaufgaben eingesetzt werden.

Wichtig ist die Wärme-Kälte-Kopplung insbesondere für die Raumklimagestaltung. Die für die Wärmepumpenzentrale gegenüber Heizhäusern erforderlichen höheren Investitionen sind oft deshalb schon zu rechtfertigen, weil eine effektive Klimatisierung im Sommerbetrieb ermöglicht wird. Durch den Wärmepumpenbetrieb werden dann gegenüber dem Heizbetrieb mit fossilen Brennstoffen nicht nur Primärenergie und Bedienungsaufwand eingespart, sondern es verbessern sich zu-

gleich die Arbeits- und Lebensbedingungen im Sommer. Die Einhaltung der Raumtemperatur in den Behaglichkeitsgrenzen erfordert in vielen Fällen im Sommer eine Kälteleistung, die, soweit nicht außergewöhnliche innere Wärmelasten vorliegen, von der Wärmepumpe erbracht werden kann.

c) Gleichrangige Kälte-Wärme-Kopplung

Auch die Kälte-Wärme-Kopplung unter dem Gesichtspunkt des gleichrangigen Wärme- und Kältebedarfs stellt eine intensive Wärmepumpenanwendung dar. Zusätzliche Investitionen für den Kältesatz sind nur dann erforderlich, wenn der Wärmebedarf größer ist als die Kondensatorleistung bei Kältemaschinenbetrieb. Aber auch bei höherem Wärmebedarf sind die zusätzlichen Investitionen für den Wärmepumpeneinsatz im Vergleich zu einer zusätzlichen Zentrale mit fossilen Brennstoffen unter Berücksichtigung des Bedienungsaufwandes in vielen Fällen gerechtfertigt.

Die Nutzungspriorität beeinflußt insbesondere das Ziel der Optimierung und ist deshalb ein wichtiger Gesichtspunkt der Kälte-Wärme-Kopplung.

Ein weiterer Gesichtspunkt ergibt sich aus den Kopplungsbedingungen. Die Kälte-Wärme-Kopplung schafft zusätzliche Zwangsbedingungen, die die Zahl der Freiheitsgrade, d. h. der variierbaren Parameter für die optimale Auslegung des Kreisprozesses, beeinflussen. In Abhängigkeit von diesen Kopplungsbedingungen werden verschiedene Arten der Wärme-Kälte-Kopplung unterschieden.

5.1. Gleichzeitige Kälte-Wärme-Kopplung

Der energieökonomisch interessanteste Fall der Kälte-Wärme-Kopplung ist dann gegeben, wenn Kühlungs- und Heizungsbedarf gleichzeitig bestehen. Beide Bedarfsträger werden – wie im Bild 18 ersichtlich – über die Wärmepumpe gekoppelt.

Die Kälteanlage besitzt zur Wahl der Systemparameter keine Freiheitsgrade und ist gegebenenfalls überbestimmt.

In einem Obstkühllagerhaus ist z. B. auch im Winter ein Betrieb der Kältemaschinen erforderlich, da die frei werdende Atmungswärme des Kühlgutes abgeführt werden muß. Zum Standort von Obstkühllagerhäusern gehören Sozialgebäude, Verwaltungseinrichtungen und Vermarktungshallen, die im Winter Heizenergie benötigen. Dieser Heizwärmebedarf kann durch die Kältemaschinen abgedeckt werden. Im Bild 19 ist die prinzipielle Lösung dargestellt. Beim Auslegen der Kältemaschine muß darauf geachtet werden, wie sich die direkte Kopplung auf das Arbeitsregime auswirkte (z. B. Rückwirkung auf die Verdampfungstemperatur).

Objekte mit gleichzeitiger Kälte-Wärme-Nutzung benötigen keine Investitionen für den zur Heizung eingesetzten Kältesatz, der Heizbetrieb ist mit geringer zusätzlicher elektrischer Energie möglich, jedoch müssen, wie gesagt, Rückwirkungen bei der Auslegung bedacht werden.

5.2. Wechselseitige Kälte-Wärme-Kopplung

Objekte mit wechselseitiger Kälte-Wärme-Kopplung können sowohl für einen Bedarfsträger als auch für mehrere zu koppelnde Bedarfsträger realisiert werden. Ein wechselseitiger Kälte-Wärme-Bedarf tritt immer bei der Klimagestaltung von Räumen auf. Die für die Kühlung der Raumluft im Sommer einzusetzende Kältemaschine kann im Winter zur Heizung genutzt werden (Bild 20).

Bei der wechselseitigen Kälte-Wärme-Nutzung werden Kühlung und Heizung indirekt gekoppelt. Ein unterschiedliches Arbeitsregime bei Kühl- und Heizbetrieb ist im begrenzten Umfang möglich. Die Umschaltung kann sowohl im Kältekreislauf, im Netz des flüssigen Wärme- bzw. Kälteträgers, als auch in den Luftleitungen erfolgen.

Objekte mit wechselseitiger Kälte-Wärme-Nutzung benötigen keine Investitionen für den zur Heizung eingesetzten Kältesatz, der Heizbetrieb erfordert zusätzliche elektrische Energie. Durch die indirekte Kopplung sind unterschiedliche Fahrweisen für die Heizung und Kühlung realisierbar.

5.3. Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicherung

Eine besondere Kopplungsbedingung der Wärme- und Kältenutzung ergibt sich durch den Einsatz von Speichern. Die Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicherung kann sowohl für mehrere Objekte als auch für die Kälte-Wärme-Nutzung eines Objektes erfolgen.

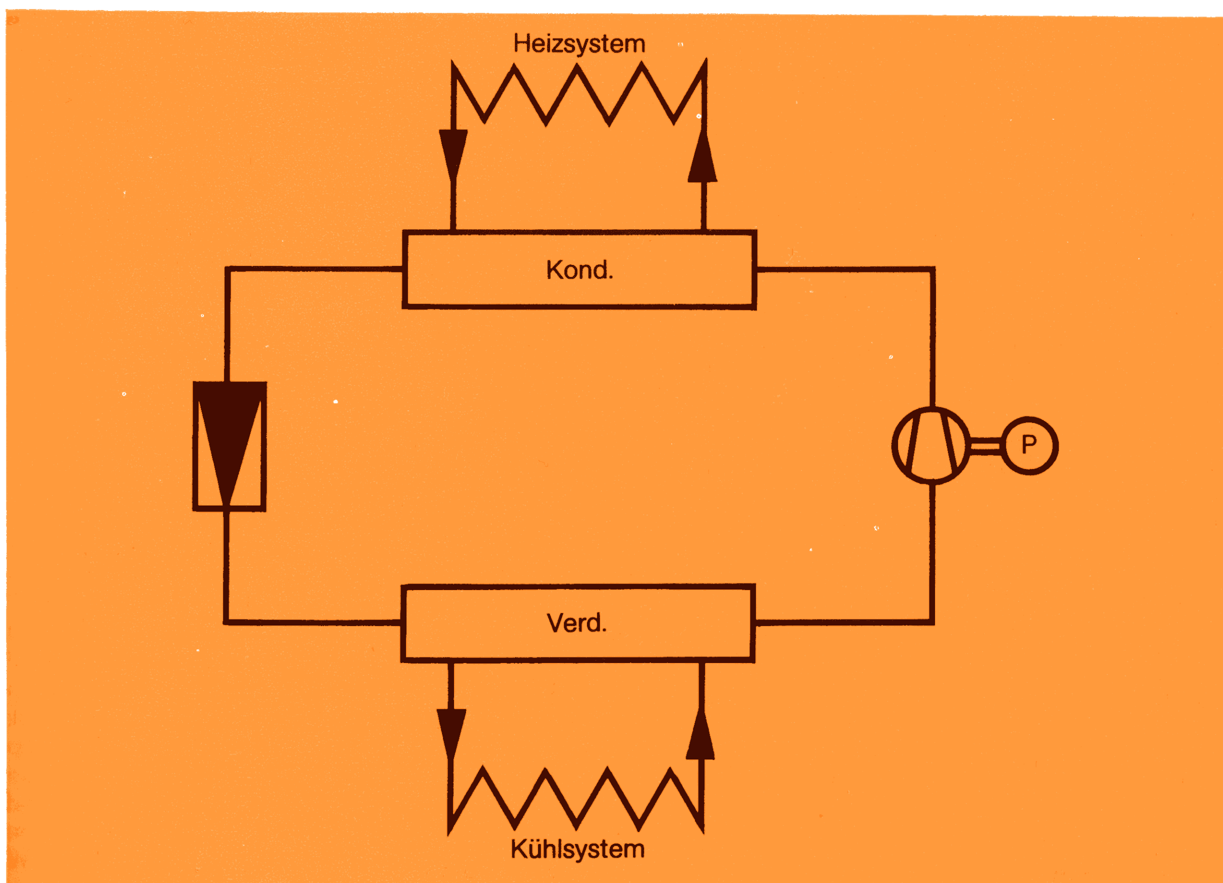
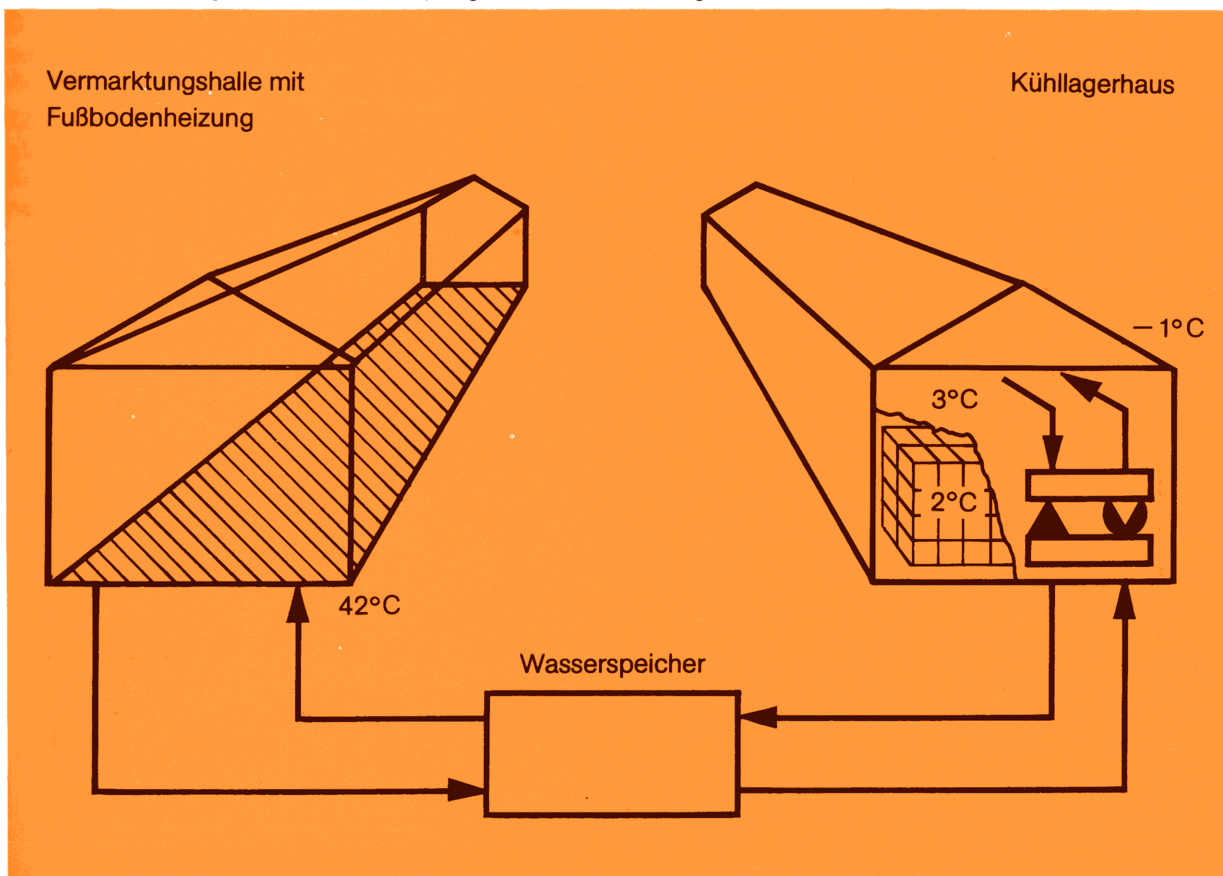


Bild 18 Schaltung der gleichzeitigen Kälte-Wärme-Kopplung

Bild 19 Gleichzeitige Kälte-Wärme-Kopplung in einem Obstkühllagerhaus



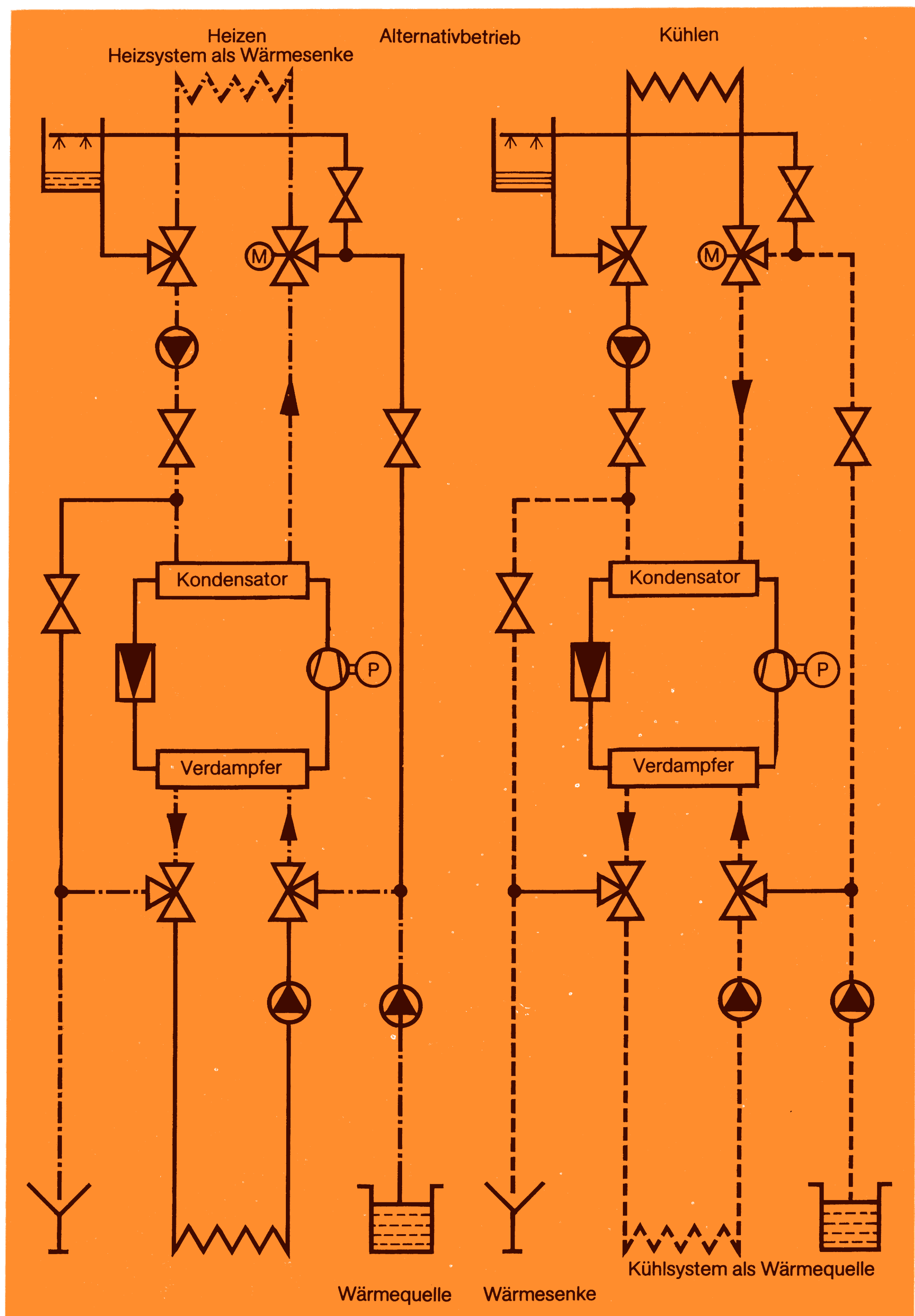


Bild 20 Wechselseitige Kälte-Wärme-Kopplung

Der Speicher hat die Aufgabe, das zeitabhängige Defizit des Wärme- und Kältebedarfs auszugleichen.

Aus Bild 21 geht die prinzipielle Schaltung der Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicherung hervor.
Bei Objekten der Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicherung ist ein Ausgleich des zeitabhängig auftretenden Defizits der Wärmequellen und -senken möglich. Dadurch kann die Leistung der Kältesätze verringert werden. Die Speicher wirken dämpfend und dadurch gewissermaßen entkoppelnd. Dank den Speichern ist ein zusätzlicher Freiheitsgrad für die Wahl der Systemparameter vorhanden. Diese vereinfachte Struktur erfordert jedoch den hohen Aufwand für den Speicherbehälter.
Die Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicherung ermöglicht sowohl eine gleichzeitige als auch eine wechselseitige Betriebsweise.

5.4. Kälte-Wärme-Kopplung mit integriertem Versorgungsnetz

Bei der Kälte-Wärme-Kopplung mit integriertem Versorgungsnetz besteht die besondere Kopplungsbedingung darin, daß mehrere Wärme- und Kältebedarfsträger über ein Verteilungsnetz verbunden sind. Gegenüber der konventionellen Vierleiter-Versorgung, z. B über ein autarkes Fernwärmenetz und ein getrenntes Fernkältenetz, wird durch dezentrale Wärmepumpen ein integriertes Verteilungsnetz je nach Bedarf als Wärmequelle bzw. Wärmesenke genutzt. Bild 22 demonstriert die prinzipielle Schaltung der Kälte-Wärme-Kopplung mit integriertem Versorgungsnetz. Das integrierte Niedertemperaturnetz dient im Kältemaschinenbetrieb zum Abführen der Kondensatorwärme und im Wärmepumpenbetrieb als Wärmequelle. Im idealen Betriebsfall erfolgt ein Ausgleich aller Quellen und Senken vor Ort. Ergibt sich in der Summe aller Bedarfsträger ein Wärmedefizit bzw. ein Kältedefizit, so heizt die zentrale Wärmepumpe auf, oder sie kühlt ab, wobei z. B. ein Brunnen als Wärmequelle oder Wärmesenke dienen kann. Das integrierte Versorgungsnetz hat zugleich die Funktion eines Speichers (Netzspeicher) und kann bei ausreichender Dimensionierung zum Abbau der Überbestimmung bei der Wahl der Systemparameter dienen. Bei Objekten der Kälte-Wärme-Kopplung mit integriertem Versorgungsnetz ist eine kombinierte – gleichzeitige und wechselseitige – Kälte-Wärme-Nutzung möglich.

Auch die Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicherung kann am Standort der zentralen Kältemaschine an das integrierte Versorgungsnetz angeschlossen werden.

Die Vielzahl von Wärmequellen und Wärmesenken und deren Verbindung über das integrierte Netz schafft komplexere Kopplungsbedingungen, und daraus ergeben sich erhöhte Anforderungen an Auslegung und Regelung.

Kälte-Wärme-Kopplung mit integriertem Versorgungsnetz kann innerhalb von Gebäuden, zum Ausgleich unterschiedlicher Außenlasten auf die Fassaden und unterschiedlicher Innenlasten, aber auch für Stadtzentren, Klinikkomplexe, Schulkomplexe, in Chemiekombinaten, Fleischverarbeitungskombinaten, Brauereien u. a. m. erfolgen.

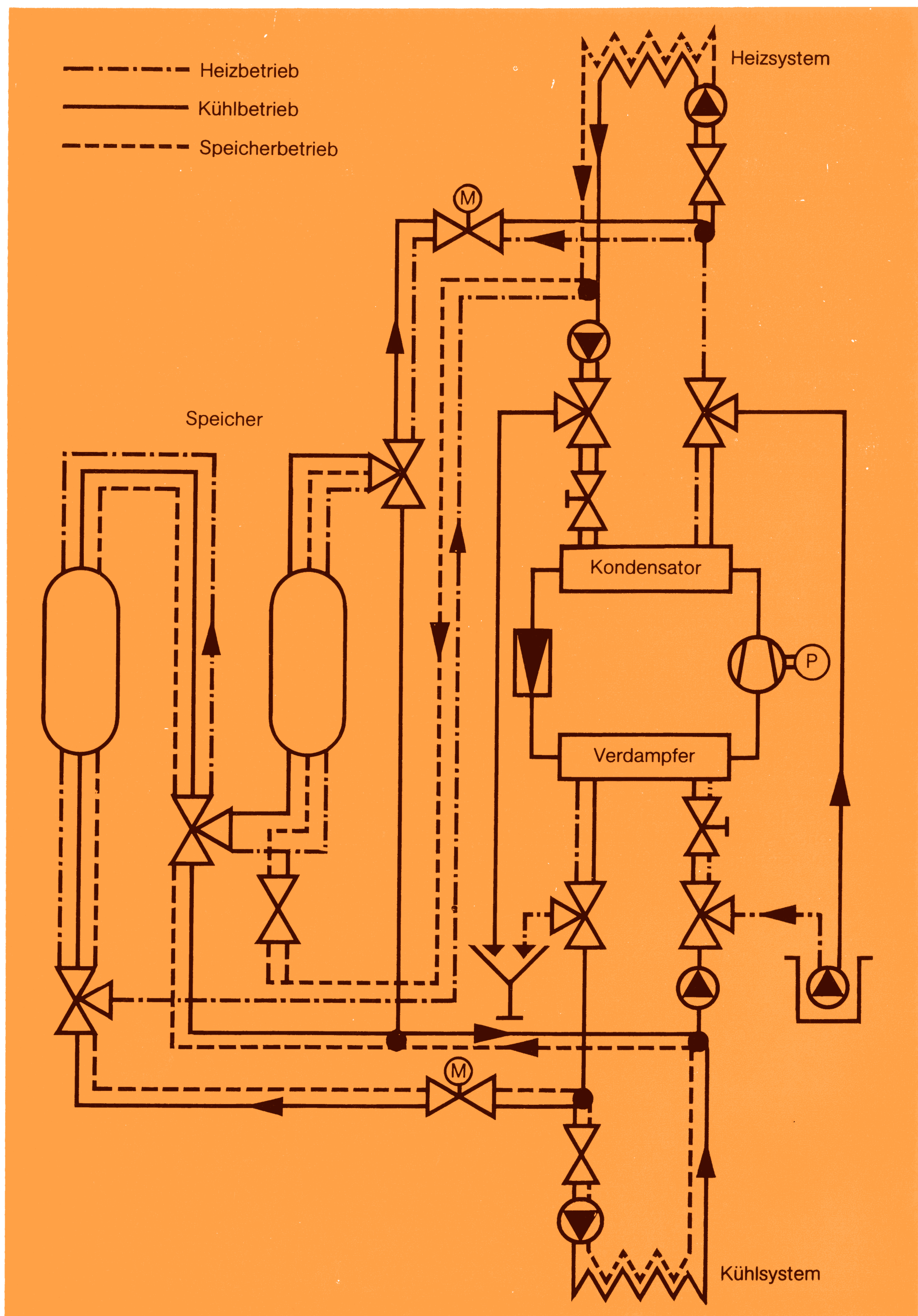


Bild 21 Kälte-Wärme-Kopplung mit Speicher

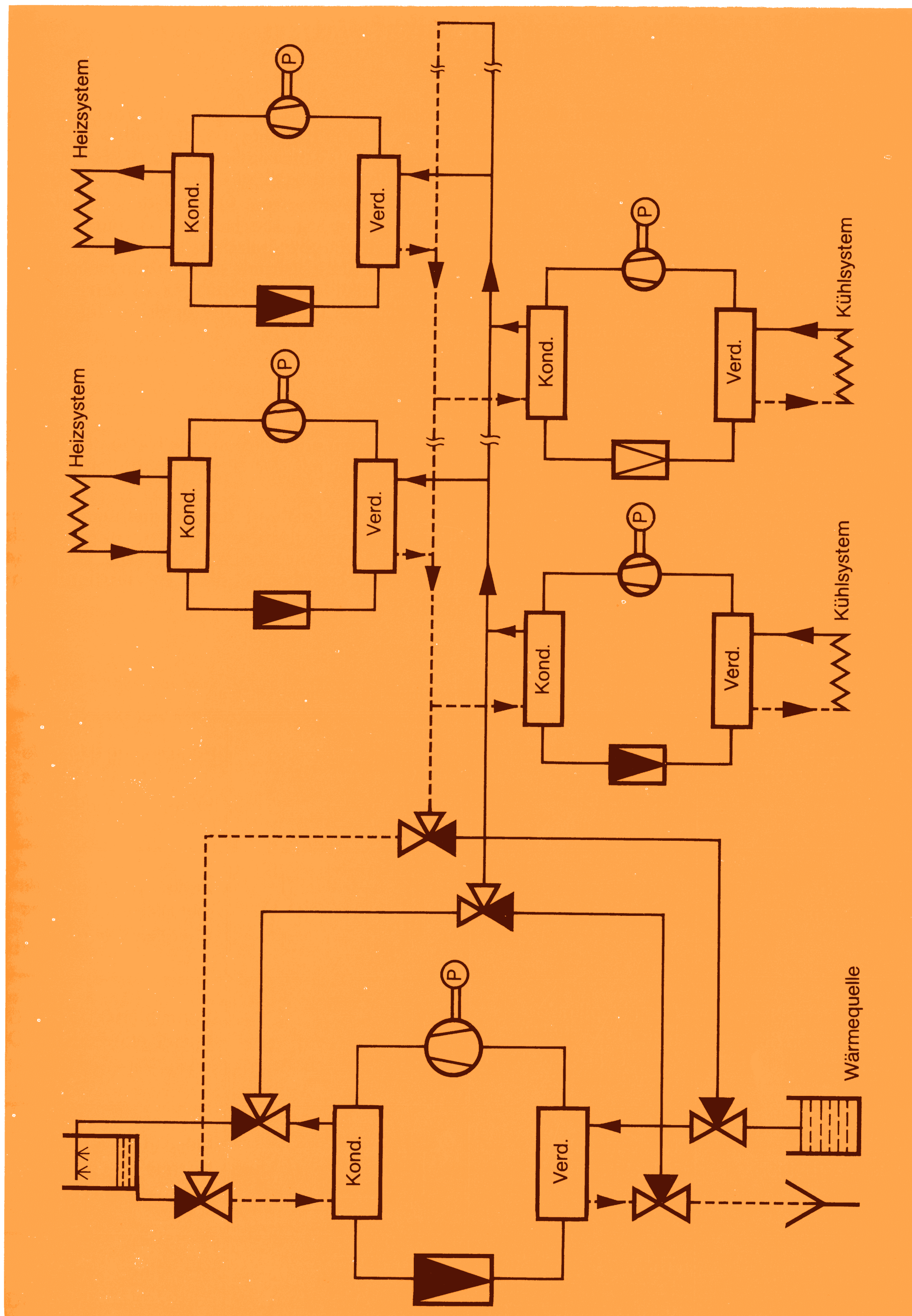


Bild 22 Kälte-Wärme-Kopplung mit integriertem Versorgungsnetz

6. Schaltung mit eingekoppelten Ausrüstungen

6.1. Einkoppelung von Speichern

Thermische Speicher können unterschiedlich in die Schaltung von Heizanlagen mit Wärmepumpen eingekoppelt werden. Speicher in Wärmepumpenanlagen haben die Aufgabe, die zeitlich veränderlichen Bedingungen der zu- und abfließenden Energieströme so auszugleichen, daß der thermodynamische Prozeß effektiver ablaufen kann. Der Wärmepumpenprozeß wird durch 3 Energieströme beeinflußt: den Wärmestrom der Wärmequelle $\dot{Q}_Q$, den Heizwärmestrom $\dot{Q}_H$ und den elektrischen Energiestrom P. Je nach dem Zweck der Speicherung ergeben sich die im Bild 23 angegebenen 4 Funktionen, die noch durch eine 5. Funktion der inneren thermodynamischen Prozeßverbesserung ergänzt werden können. Das gleiche Bild sagt aus, welche Ziele sich mit den einzelnen Speicherfunktionen verwirklichen lassen. Mit dem Zuordnen der Funktionen der Speicher zu den Energieströmen ist noch nichts darüber ausgesagt, an welche Stelle des Prozesses die Speicher angeordnet werden. Folgende Speicheranordnung ist üblich:

- Warmwasserspeicher mit Anschluß an den Kondensator
- Kältespeicher nach dem Ausgang des Verdampfers
- Speicher der Wärmequelle vor dem Eingang zum Verdampfer.

Mit gleichen Speichern lassen sich mehrere Speicherfunktionen ermöglichen. Die Netzentlastung in der Elektroenergiespitzenzeit setzt jedoch voraus, den Speicher mit der Nutztemperatur für diesen Zweck auszulegen.

Mit Hilfe von Speichern kann bei kurzzeitiger Spitzenlast die Leistung der Wärmepumpe/Kältemaschine verkleinert und bei Aussetzerbetrieb in der Elektroenergiespitzenzeit der Leistungspreis eingespart werden. Durch den Speicherbetrieb ist jedoch außerdem eine wirtschaftliche Fahrweise und damit Energieeinsparung erreichbar. Bewährt haben sich Speicher mit einer spezifischen Kapazität von 0,4 bis 0,5 m³/kW Heizleistung der Wärmepumpe.

Bild 23 Funktionen von Speichern in Nutzanlagen mit Wärmepumpen und Kältemaschinen

Wärmelast-spitzenversorgung	Abdeckung des Spitzenbedarfs der Wärmelast		Reduzierung der Auslegungsleistung und des Energieaufwandes
Kältelast-spitzenversorgung	Abdeckung des Spitzenbedarfs der Kältelast		Reduzierung der Auslegungsleistung und des Energieaufwandes
Nutzung günstiger Bedingungen der Wärmequelle	Energieoptimale Nutzung zeitweilig günstiger Bedingungen der Wärmequelle		Verminderung des Energieaufwandes
Spitzenzeit-aussetzerbetrieb	Netzentlastung in Elektroenergie-Spitzenzeit		Einsparung von Energiekosten (Leistungsanteil)
Gleitende bzw. stufenweise Speicheraufladung	Thermodynamische Prozeßverbesserung durch Annäherung an den LORENZ-Prozeß		Verminderung des Energieaufwandes

Eingekoppelte Speicher können wesentlich dazu beitragen, Heizanlagen wirtschaftlich mit Wärmepumpen auszulegen, oft auch ihre Anwendung überhaupt zu sichern. Deshalb ist die Untersuchung der Speicherfahrweise ein wichtiger Gesichtspunkt der energetischen Prozeßanalyse.

6.2. Einkoppelung von Wärmeübertragern

Die Einkoppelung von zusätzlichen Wärmeübertragern in Heizungsanlagen mit Wärmepumpen ist dann erforderlich, wenn der Wasserstrom der Wärmequelle oder des Heizmediums so verunreinigt ist, insbesondere mit korrodierenden Bestandteilen, daß er dem Wärmepumpengerät, d. h. dem Verdampfer oder Kondensator nicht zugeführt werden kann. Derartige flüssigkeitsbeaufschlagte Wärmeübertrager sind damit ein wichtiges Kopplungsglied zwischen Wärmequelle und Wärmepumpe und Wärmepumpe und Wärmesenke.

Auf Grund der Wartungsbedingungen kommen als gebräuchlichste Bauarten Wärmeübertrager nach der Rohrbündel-, Spiral- oder Plattenbauart, zum Teil in korrosionsgeschützter Konstruktion und zum Teil in Ausführung mit nichtrostenden Stählen zum Einsatz.

Ist im Ergebnis der energetischen Prozeßanalyse die direkte Anwendung von Wärmepumpen wegen der besagten starken Verunreinigung der Wärmeträger nicht möglich, sind entsprechende zusätzliche Wärmeübertrager einzukoppeln.

Die zusätzlichen Temperaturdifferenzen bringen Energieverluste, die die Leistungszahl verringern. Ein zusätzlicher Wärmeübertrager kann die Leistungszahl um einem Anteil von $\Delta\varepsilon \leqq 0{,}3$ verringern. Vielfach ist jedoch mit derartigen Zwischenwärmeübertragern die Ausnutzung von Energiequellen, insbesondere Abwässern erst möglich. Bei höheren Temperaturen der Abwärme aggressiver Medien lassen sich oft auch hohe Leistungszahlen erreichen. Die Untersuchungen zum Einkoppeln von Wärmeübertragern stellen somit einen wesentlichen Bestandteil der energetischen Prozeßanalyse zur Anwendung von Wärmepumpen dar.

6.3. Einkoppelung von Spitzenlastheizungen

Heizanlagen mit Wärmepumpen sind in zweifacher Art und Weise von der Außentemperatur abhängig:

– Mit abnehmenden Außentemperaturen steigt die Wärmelast und damit die Heizleistung.

– Mit abnehmenden Außentemperaturen sinkt häufig zugleich die Temperatur der Wärmequelle.

Die in den Objekten zu installierende Nennheizleistung wird entsprechend TGL 26 760 „Heizlast von Bauwerken" von der Außenlufttemperatur t_A in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel bestimmt. Von 275 Heiztagen mit einer Außentemperatur unter 15 °C erreichen entsprechend der mittleren Temperaturhäufigkeitskurve nur wenige Tage eine Temperatur unter – 11 °C. Temperaturen unter 0 °C werden an etwa 50 Tagen erreicht. Sind die Wärmepumpen auf eine Leistung von 50 % der Nennheizleistung ausgelegt, kann die Wärmeversorgung an 70 % der Heiztage allein durch die Wärmepumpen erfolgen.

Eine zweckmäßige Aufteilung der Lasten und Leistungen in Grundlast und Spitzenlast ermöglicht es, die energetischen und ökonomischen Bedingungen zur Anwendung der Wärmepumpe zu erweitern. Deshalb gehören Untersuchungen zum Aufteilen der Nennleistung unter dem Gesichtspunkt der Grundlast und Spitzenlast zur wärmepumpengerechten Gestaltung von Objekten.

Im Ergebnis der in 2 Leistungsbereiche aufgeteilten Nennleistung lassen sich zusätzliche Heizanlagen in 2 Varianten einkoppeln.

1. Bivalent alternative Heizung:
   Die Grundleistung wird durch Wärmepumpen abgedeckt, und in Zeiten der Spitzenlast wird die gesamte Nennleistung ohne Inanspruchnahme fernleitungsgebundener Energieträger mit einem zusätzlichen Heizsystem verwirklicht.
2. Bivalent parallele Heizung:
   Die Grundleistung wird durch Wärmepumpen abgedeckt, und in Zeiten der Spitzenlast wird zusätzlich ein Heizsystem mit der Differenzleistung einbezogen, das ohne Inanspruchnahme fernleitungsgebundener Energieträger arbeitet.

Die Wahl zwischen diesen Varianten ist von vielerlei Bedingungen abhängig. Entscheidender Faktor ist jedoch der Verlauf der Temperatur der Wärmequelle in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

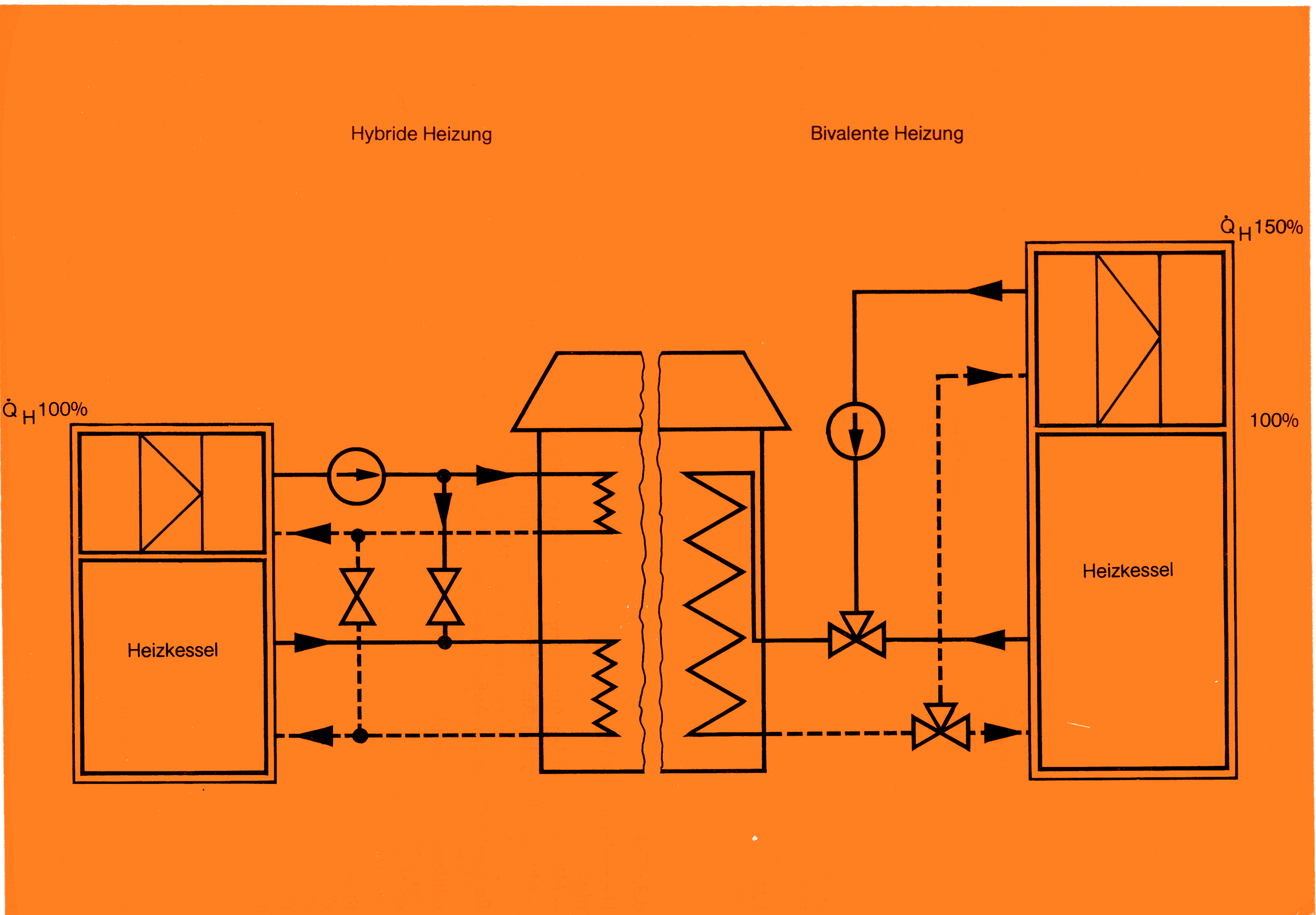


Bild 24 Hybride und bivalente Heizungsanlagen mit Wärmepumpen

Der Unterschied zwischen hybriden und bivalent alternativen Heizungsanlagen mit Wärmepumpen ist im Bild 24 dargestellt.

Das Prinzip der hybriden Heizung besteht aus der Kombination von Niedertemperatur- und Hochtemperaturheiznetz.

Wärmepumpen decken die Grundlast beider Netze ab. Im Spitzenlastfall wird dem Niedertemperaturheiznetz, das nach wie vor mit Wärmepumpen versorgt wird, eine konventionelle Brennstoff- oder Fernwärmeheizung parallel geschaltet. Im Gegensatz zu bivalenter Heizung (vollständiger entweder/oder-Betrieb) überschreitet die gesamte installierte Heizleistung den Wert 100 % nicht. Die hybride Heizung ist vor allem im Rekonstruktionsfall vorteilhaft einsetzbar, wenn eine bestehende Heizanlage erweitert werden muß.

7. Objekte mit wärmepumpengerechter Antriebsenergie-Versorgung

7.1. Objekte mit einschieniger Elektroenergieversorgung

Der Vorteil von Wärmepumpen wirkt besonders an solchen Standorten, bei denen zur elektrisch betriebenen Heizung keine Alternative besteht. Dezentrale Standorte können häufig nur mit erheblichem Aufwand oder nicht ganzjährig mit fossilen Brennstoffen versorgt werden, so daß auf eine einschienige Elektroenergieversorgung orientiert wird.

Da die Elektroheizung nur mit einer Primärenergieausnutzung von 27 ... 34 % arbeitet, ist die Wärmepumpe an dezentralisierten und einschienig versorgten Standorten mit wesentlich geringeren Leistungsziffern wirtschaftlich.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist an einschienig versorgten Standorten die Wärmepumpe der direkten elektrischen Heizung immer überlegen, wenn eine wärmepumpengerechte Gestaltung gesichert wird. Eine Alternative zur Wärmepumpe stellt in solchen Gebieten nur die elektrische Nachtspeicherheizung dar.

Die Ausnutzung des Nachtstromes ist jedoch auch mit Wärmepumpen durch Anwendung von Tages-Niedertemperaturspeichern oder Speichern in Bivalenz zum Wärmepumpenbetrieb möglich. Dabei sind Wirtschaftlichkeitsüberlegungen erforderlich, um den höheren Aufwand für den Niedertemperaturspeicher durch den geringeren Energiepreis der Nachtstromentnahme zu amortisieren.

Wirtschaftliche Lösungen sind auch mit bivalenten Heizungsanlagen erreichbar, bei denen das zusätzliche Heizsystem durch Elektrodenspeicheranlagen und damit unterhalb einer bestimmten Außentemperatur mit Hochtemperaturspeichern realisiert wird.

7.2. Objekte mit begrenzter Leistung in der Elektroenergiespitzenzeit

Elektrisch betriebene Wärmepumpen können auch dann eingesetzt werden, wenn, bedingt durch die Kontingentierung, in der Elektroenergiespitzenzeit das Netz nicht mehr zusätzlich belastbar ist. In diesem Fall muß die Leistung der Wärmepumpe in Verbindung mit der Kapazität eines Niedertemperatur-Warmwasserspeichers so bemessen werden, daß während der Spitzenzeit die Wärmepumpe nicht in Betrieb ist und damit die Nutzanlage durch den Speicher mit einer Kapazität von 0,4 bis 0,5 m^3/kW versorgt wird.

7.3. Objekte mit nutzbarer Hochtemperaturabwärme

Durch die energetische Prozeßanalyse kann auch Hochtemperaturabwärme auf ihre Nutzungsfähigkeit für den Wärmeprozeß als Antriebsenergie für Absorptionswärmepumpen untersucht werden. Absorptionswärmepumpen mit dem Stoffpaar Ammoniak-Wasser des VEB Mafa Halle sind besonders wirtschaftlich einsatzfähig mit einem Antriebsenergiestrom für den Austreiber im Temperaturbereich zwischen 140 bis 170 °C.

Die Hochtemperaturabwärme wird dem Austreiber zugeführt. Dabei ist zu sichern, daß die Temperatur im Kältemittel-Lösungsmittelteil des Austreibers wegen der Zersetzung des NH_3 170 °C nicht überschreitet.

7.4. Objekte mit Heizkesseln nahe von Umwelt- und Abwärmequellen

Der Einsatz von Absorptionswärmepumpen ist auch dann zu empfehlen, wenn sich Heizungsanlagen nahe von Umwelt- und Abwärmequellen erforderlich machen und für elektrische Wärmepumpen keine Energie bereitgestellt werden kann. Durch den Antrieb von Absorptionswärmepumpen mit Hilfe vorgeschalteter Heizkessel, z. B. auf der Basis fester Brennstoffe, können 30 bis 40 % Primärenergie eingespart werden. Die Nachschaltung von Absorptionswärmepumpen läßt sich auch bei der Rekonstruktion vorhandener Heizkesselanlagen für fossile Brennstoffe einsparen, wenn die dargestellten zusätzlichen Wärmequellen vorhanden sind und Niedertemperaturheizsysteme verwirklicht werden können.

Energetische Prozeßanalysen auf der Grundlage der dargestellten Einsatzbedingungen ermöglichen es, die Voraussetzungen für die Anwendung von Wärmepumpen zu analysieren und eine wärmepumpengerechte Gestaltung mit dem Ziel zu sichern, einen höheren ökonomischen Effekt zu erreichen und in beträchtlichem Maße Primärenergie einzusparen.

Literaturverzeichnis

⟨1⟩ Langheinecke, K.: Zur Terminologie der Wärmepumpentechnik. Klima- und Kälteingenieur 8 (1978) 1

⟨2⟩ Recknagel; Sprenger: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 77/78, 59. Ausgabe, München, Wien R. Oldenburg Verlag 1977

⟨3⟩ Heinrich, G.; Toufar, D.: Primärenergieeinsparung durch Wärmepumpenheizungsanlagen. Luft- und Kältetechnik 1979/4, S. 173 bis 178

⟨4⟩ TGL 190–452 Wirtschaftlicher Energieträgereinsatz, Ausgabe Juli 1973

⟨5⟩ Pauer, W.; Menzer, H.: Grundlagen der Luft- und Wärmewirtschaft; Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen, Bd. 20 Dresden: Theodor Steinkopff Verlagsbuchhandlung, 1970

⟨6⟩ Heinrich, G.; Najork, H.: Energetische Koppelungen in raumlufttechnischen Anlagen mit Wärmepumpen

⟨7⟩ Kraft, G.: Die Nutzung niedertemperierter Wärmequellen ist nicht nur ein Gebot der Stunde Vorwort LKT 1979/3, Seite 122

⟨8⟩ Heinrich, G.; Najork, H.; Nestler, W.: Wärmepumpen für Industrie, Landwirtschaft und Gesellschaftsbau Verlag Technik Berlin 1978

⟨9⟩ Gbl. der DDR Teil II, Nr. 8 vom 12. 2. 1972

⟨10⟩ Petzold, R.: Wärmelast (Reihe Luft- und Kältetechnik, Berlin) VEB Verlag Technik 1975

⟨11⟩ Plank, R.: Handbuch der Kältetechnik, Bd. 6A Berlin, Springer-Verlag 1969

Übersicht über die Tafeln

Übersicht über die Bilder

Dia-Ton-Vorträge - Eine Auswahl

Der Einfluß von Forschung und Entwicklung auf den effektiven Energieeinsatz

Fratzscher

Fassung I – 33 Dias	Bestell-Nr. 1a
Fassung II – 20 Dias	Bestell-Nr. 1b

Anregungen zur energiewirtschaftlichen Rationalisierung

Neidhardt

Vortrag A	für Industriebetriebe allg.	Bestell-Nr. 2a
Vortrag B	für Chemiebetriebe	Bestell-Nr. 2b
Vortrag C	für Landwirtschaftsbetriebe	Bestell-Nr. 2c

Rationelle Kondensatwirtschaft

Autorenkollektiv

36 Dias	Bestell-Nr. 7

Aufträge zur Ausleihe von Dia-Ton-Vorträgen sind drei Wochen vor dem gewünschten Termin schriftlich an die DEWAG LEIPZIG, HA G 1, zu richten. Die Leihgebühr für Dia-Ton-Vorträge wird auf Tage berechnet und beträgt pro Ausleihtag 7,– M (gem. PKBl 408 – V 2).

Für die Dia-Ton-Vorträge sind erforderlich:

- Dia-Projektor Aspectomat
- Tonbandgerät (Geschwindigkeit 9,5 m/s)
- Steuergerät SG 1
  (bei automatischer Bedienung)

Vorführgeräte werden nicht ausgeliehen.

Institut für Energetik
Zentralstelle für rationelle Energieanwendung

Herausgegeben: 1980

Regie und Gestaltung: DEWAG LEIPZIG

Satz und Druck: Messedruck Leipzig

3,– M

III-18-149 Lp 164-10-80